

UNIVERSITE DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE Science et Ingénierie pour l'Information

FACULTE des Sciences et Techniques de Limoges

XLIM-Département MINACOM

Thèse N° [-----]

Thèse

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES

Discipline : « Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et Systèmes »

Présentée et soutenue par

Rim RAMMAL

Le 4 Juillet 2014

**Conception de Composants Microondes Innovants basés sur
de Nouveaux Procédés Technologiques de Fabrication**

Thèse dirigée par Nicolas DELHOTE, Olivier TANTOT,

Serge VERDEYME

T. CHARTIER	Professeur à l'Université de Limoges, SPCTS	Président
E. RIUS	Professeur à l'Université de Bretagne Ouest, Lab STICC, Brest	Rapporteur
F. NDAGIJIMANA	Professeur au Laboratoire IMEP-LAHC-Minatec, INP Grenoble	Rapporteur
L. CARPENTIER	Ingénieur Hyperfréquences, CNES Toulouse	Examineur
H. LEBLOND	Ingénieur à Thales Alenia Space	Examineur
N. DELHOTE	Maître de Conférences à l'Université de Limoges, XLIM	Examineur
O. TANTOT	Maître de Conférences à l'Université de Limoges, XLIM	Examineur
S. VERDEYME	Professeur à l'Université de Limoges, XLIM	Examineur

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été effectués au sein du département MINACOM (Micro et Nanotechnologies pour Composants Optoélectroniques et micro-ondes) de l'Institut de Recherche XLIM UMR CNRS 6172, dirigé par Valérie MANDRANGEAS, Professeur à l'Université de Limoges. Je lui exprime ma plus profonde reconnaissance pour m'avoir accueilli dans son équipe.

Je tiens dans un premier temps à remercier M. Dominique BAILLARGEAT, directeur du laboratoire XLIM, de m'avoir accueilli et permis de réaliser ces travaux.

Ce travail été effectué sous la direction de M. VERDEYME Serge, professeur à l'Université de Limoges, M. DELHOTE Nicolas, maître de conférence à l'Université de Limoges et M. TANTOT Olivier, maître de conférence à l'Université de Limoges, auxquels je tiens à exprimer tous mes remerciements pour leur aide, leur expérience et leurs connaissances et je leur exprime ma sincère reconnaissance pour leur disponibilité et pour leurs qualités scientifiques et humaines.

Je remercie M. PERIGAUD Aurélien, Ingénieur de recherche à l' Xlim, qui a su par son expérience m'aider à avancer dans les travaux, je lui exprime ma sincère reconnaissance pour ces qualités scientifiques et humaines.

Je suis très reconnaissant à M. Thiery CHARTIER, directeur de recherche au SPCTS, d'avoir accepté de présider ce jury.

J'exprime ma sincère gratitude à M. RIUS Eric, Professeur à l'Université de Bretagne Ouest Brest, et à M. NDAGIJIMANA Fabien, Professeur au Laboratoire IMEP-LAHC-Minatec Grenoble, qui ont accepté d'assurer la tâche de rapporteurs.

Je remercie sincèrement M. LEBLOND Hervé, Ingénieur à Thales Alenia Space et M. CARPENTIER Ludovic, Ingénieur Hyperfréquences à CNES Toulouse, qui ont accepté d'examiner ce rapport.

Je remercie Mme. Marie-Laure GUILLAT, secrétaire du département MINACOM, pour son aide précieuse.

Je remercie M. Damien PASSERIEUX et M. GUINES Cyril qui m'ont apporté leur précieuse participation lors des mesures.

Je remercie également les personnes dans l'équipe MINACOM pour tant des choses que je ne peux pas les citer ici et surtout un grand merci à mes collègues de l'équipe.

J'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes amis de Limoges Nouredine Khelifi, ELhadj Ahmad, Hamed Rammal, Mortada Oussama, Hadia RAMMAL, Hussein Alaaeddine, Nivine Srouf, Kassem AL Akhdar, EIRaïi Ali , Ali Khalil, Zeineb Ben Aziza, Jacob Dia, Sabra Ali, Jamal Rammal, Faten Kouki, Ahmad El Basti, Abou Taam Hussein.

Je remercie aussi et très chaleureusement ma cousine Malak Soueid pour ses valeurs humaines, pour la force qu'elle me transmettait dans les moments les plus difficiles, pour son soutien et ses encouragements sans faille, pour son aide et pour pleine d'autres choses.

Un merci qui tend vers l'infini pour Rana & Yara, Amies pour la vie 🎵.

Enfin, le plus grand merci va à toute ma famille, plus particulièrement, à mes parents Ibrahim et Fatima qui ont cru en mes capacités et m'ont laissée quitter le nid familial pour réaliser mon rêve de devenir docteur. Merci pour leur prières qui m'ont aidée à aller jusqu'au bout. Difficile en quelques mots de leur exprimer toute ma reconnaissance et tout mon amour.

Merci également à mes sœurs Rafif et Rayane, mes frères Hussein et Diaa, mes beaux frères Wassim et Hassan et ma belle sœur Ayate. Je n'oublie pas mes oncles surtout Mohamad et ali, mes tantes qui me transmettaient leur soutien, ma grande mère et mon grand père.

Rim RAMMAL

Table de matière

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Les technologies Céramiques multicouches pour l'électronique	5
I. Introduction.....	7
II. Les technologies de fabrications céramique multicouches et multimatériaux	8
II.1. Stéréolithographie (SLA)	10
II.2. Jet d'encre.....	10
III. Les technologies multicouches.....	12
III.1. La technologie jet d'encre	12
III.2. Le procédé LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic).....	18
III.3. Comparaison entre les deux technologies	21
IV. Les filtres microondes	23
IV.1. Optimisation du filtre: Utilisation des paramètres de couplage extraits à partir de la matrice idéale	24
IV.2. Les différentes technologies de filtre	26
IV.3. Dispositifs microondes accordables.....	32
V. Conclusion.....	39
VI. Références chapitre I.....	40
Chapitre II: La technologie jet d'encre pour l'impression des composants multi-matériaux.....	44
I. Introduction.....	46
II. Les équipements de la technologie Jet d'encre.....	48
II.1. Dispositif mécanique de déplacement des têtes	49
II.2. Dispositif d'impression.....	49
II.3. Un pilotage informatique spécifique de l'ensemble	50
III. Caractéristiques des encres déposées	51
IV. Caractérisation de l'éjection de l'encre métallique avec la tête d'impression.....	52
V. Essai préliminaire: résonateur diélectrique excité par des lignes microruban imprimées par la technologie jet d'encre	54
V.1. Présentation du résonateur.....	55
V.2. Mesure des dimensions	57
V.3. Mesures et rétro simulation (HFSS).....	58
VI. Impression des motifs 2D	59
VI.1. Les paramètres d'impression	60
VI.2. Mesures expérimentales après impression	62
VI.3. Détermination des caractéristiques des dépôts.....	63
VI.4. Epaisseur des dépôts	67
VI.5. Conclusion	67
VII. Impression des composants Multi-matériaux	68
VIII. Capacité MIM Multicouche	70
VIII.1. Définition.....	70
VIII.2. Impression des couches de matériaux céramiques de type Heraeus	72

VIII.3. Impression des couches de matériaux métalliques.....	73
VIII.4. Cofrittage multimatériaux	75
IX. Résonateur SIW (Substrate Integrated Waveguide)	78
IX.1. Résonateurs SIW en technologie LTCC	78
IX.2. Résonateurs SIW en technologie jet d'encre	79
X. Conclusion.....	84
XI. Références chapitre II	86
Chapitre III: Filtre Hyperfréquences multi-matériaux	87
I. Introduction.....	89
II. La théorie de filtrage.....	90
III. Filtres interdigités.....	91
III.1. Un peu d'histoire	91
III.2. Synthèse de filtres inter-digités	92
III.3. Couplage M et facteur de couplage k.....	93
III.4. Impacts des divers éléments constitutifs d'un filtre inter-digité	94
III.5. Filtre interdigité de référence:	96
III.6. Filtre interdigité multi-matériaux	99
III.7. Comparaison entre les différents filtres simulés :	101
IV. Filtre interdigité sans via.....	103
IV.1. Filtre interdigité de référence :.....	103
IV.2. Filtre interdigité multicouche :.....	105
IV.3. Comparaison entre les filtres avec vias et les filtres tronqués :	106
V. Validation expérimentale	107
V.1. Fabrication finale.....	110
V.2. Filtres multicouches et multimatériaux	112
VI. Conclusion	116
VII. Références chapitre III.....	119
Chapitre IV: Composants accordables	120
I. Introduction.....	122
II. Accord en fréquence par report de composants montés en surface.....	123
III. Modèle équivalent d'une diode varactor	125
III.1. Résonateur Hairpin.....	125
III.2. Résonateur planaire $\lambda/2$	128
IV. Démonstrateur quasi-volumique : résonateur type SIW accordable.....	130
V. Résonateur accordable par actionneur piézoélectrique	133
V.1. Principe de fonctionnement.....	134
V.2. Mesures expérimentales	137
V.3. Structure monobloc céramique.....	138
VI. Conclusion	140
VII. Référence de chapitre IV	141
Conclusion générale	142
Annexe I : Etude de sensibilité des dispositifs multicouches.....	145
I. Etude de sensibilité sur le filtre sans capacités	145
II. Etude de sensibilité sur le filtre avec capacités	146
Annexe II : Présentation de techniques de fabrication développées	
pour les composants céramiques 3D.....	148

I. Procédure de fabrication des vias.....	148
I.1. Etape 1 :perçage des vias et gravure de motifs de centrage.....	148
I.2. Etapes 2 et 3 : métallisation des vias	149
I.3. Etape 4: Impression par jet d'encre.....	150
II. Présentation de la machine à ablation laser	150
III. Le procédé de métallisation par bain autocatalytique	152

Introduction générale

L'augmentation du nombre d'utilisateurs des différents réseaux de communication tels internet à haut débit, les systèmes sans fil et la téléphonie mobile, a provoqué un bouleversement dans l'utilisation des composants de télécommunication. Le nombre grandissant d'utilisateurs et d'applications impose de trouver de nouvelles solutions pour améliorer les performances, notamment les contraintes en termes d'encombrement et de spécifications électriques qui sont en général très contraignantes. L'évolution des télécommunications mène à une montée en fréquence de fonctionnement, donc à une naissance de nouveaux composants, nouvelles fonctions et contraintes d'intégration.

L'explosion des communications mobiles a donc conduit à imposer des critères de plus en plus sévères à toutes les fonctions de l'électronique et notamment à celles qui assurent le filtrage des signaux. Les filtres hyperfréquences doivent répondre à des contraintes de natures physiques (poids, encombrements,...) et électriques (sélectivité, temps de propagation de groupe, pertes, tenue en puissance...) très strictes. De plus, la réduction des coûts de conception et d'exploitation de ces dispositifs est un point clef dans le cadre d'un processus industriel.

Deux technologies de prototypage rapide sont utilisées dans ce travail pour la fabrication des composants hyperfréquences : la technologie stéréolithographie et la technologie jet d'encre.

La technologie de fabrication par stéréolithographie utilisée est un procédé breveté; il permet de réaliser en 3D des structures céramiques complexes dédiées à différents domaines tels que la médecine, la mécanique et cette technologie de fabrication est appliquée depuis quelques années dans le domaine des microondes.

La technologie jet d'encre est une technologie multicouche qui permet de déposer des encres métalliques et diélectriques. Cette technologie innovante a fait l'objet d'un dépôt de brevet et permet la réalisation de structures tridimensionnelles par prototypage rapide. Cette technologie présente des avantages au niveau des coûts et un aspect multicouche qui permet à cette technologie d'être comparée avec d'autres technologies multicouches comme la technologie LTCC.

Les matériaux céramiques sont caractérisés par trois propriétés principales : § une permittivité diélectrique potentiellement élevée ; § une tangente de pertes qui peut être faible permettant ainsi d'obtenir des résonateurs à forts facteurs de qualité à vide et par conséquent

contribuer à une meilleure sélectivité de la bande passante des filtres passe bande; § et une stabilité thermique autour de la fréquence de travail (importante pour l'utilisation du composant dans différents environnements sans altération de ses performances).

Ce mémoire de thèse s'articule en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré dans sa première partie à la présentation de la technologie jet encre et la stéréolithographie 3D après avoir rapidement décrit les principes du prototypage rapide. Celui-ci nous permet de mettre en avant ces deux technologies développées à Limoges et de mieux cerner les avantages et contraintes associés. Par la suite, un état de l'art de la technologie d'impression jet d'encre sera établi afin de comprendre la stratégie qui a conduit à choisir ce procédé. Enfin, quelques exemples concrets de réalisation d'objets par dépôt jet d'encre de matériaux seront proposés pour illustrer les faisabilités de cette technologie innovante. La deuxième partie de ce chapitre est dédiée à l'état de l'art des différentes technologies de filtre que nous pouvons trouver dans le domaine des hyperfréquences.

Le deuxième chapitre est consacré dans sa première partie à la présentation de la technologie jet d'encre avec les différents tests de cette technologie en 2D par l'impression de motifs de différentes formes en utilisant l'encre d'argent. Ces différents tests nous permettent d'évaluer la précision de fabrication de cette technologie et surtout d'extraire la valeur de la conductivité de l'encre argent imprimée. Dans la deuxième partie de ce chapitre, une première fabrication multicouches des capacités avec l'impression d'une encre diélectrique qui présente une faible température de cuisson (900°C) pour assurer une cuisson de l'encre argent. Cette encre diélectrique est l'encre céramique Hereaus 56K61 qui sera développée par le laboratoire SPCTS pour la rendre compatible avec la technologie jet d'encre.

Dans le troisième chapitre, on vient valider l'aspect multicouche de cette technologie par l'impression d'un filtre interdigité multicouche qui permet d'avoir une réduction de taille par rapport à un filtre interdigité normal. Une vue rapide sur la théorie générale de filtrage est tout d'abord abordée avant de passer aux différentes étapes de fabrication de ces deux filtres inter-digités. Les étapes de métallisation et de perçage associées à la technologie jet d'encre sont décrites. Ces deux étapes ont été réalisées au sein du laboratoire Xlim, grâce à la mise en place d'un banc de métallisation au sein de la salle blanche et la prise en main d'une nouvelle machine par ablation laser.

Le quatrième chapitre est dédié à l'application accordable pour profiter de l'aspect multicouche de la technologie jet d'encre avec l'extraction d'un modèle équivalent d'une

diode varactor à l'aide de résonateurs planaires. Une accordabilité mécanique à l'aide d'un actionneur piézoélectrique est présentée dans ce chapitre pour essayer d'obtenir une grande accordabilité avec un résonateur volumique qui présente un bon facteur de qualité.

Pour terminer ce manuscrit, une conclusion générale sur l'ensemble des travaux réalisés et des perspectives de recherche associées seront présentées.

Un projet de recherche a été servi de support à ces travaux : l'action R&T CNES n° R-S11/TG-0001-020(2010-2013).

Chapitre I: Les technologies Céramiques multicouches pour l'électronique

I. Introduction

Les objectifs du travail de thèse décrits dans ce manuscrit concernent la conception et la réalisation de structures et de filtres multicouches basés sur une technologie innovante appelée la technologie jet d'encre. Cette technologie sera tout d'abord positionnée dans le panorama maintenant vaste des technologies multicouches permettant la réalisation de composants hyperfréquences (filtres passifs en particulier) planaires (2D), multicouches (2,5 D) voire 3D.

La technologie jet d'encre utilisée dans ce travail a été développée à Limoges au sein du laboratoire SPCTS avant d'être transférée dans la PME Ceradrop. Elle sera présentée dans ce chapitre est en particulier comparée avec d'autres technologies comme celle du Low Temperature Co-fired Ceramic (LTCC) et du High Temperature Co-fired Ceramic (HTCC), ces deux permettant d'une manière similaire le dépôt multicouches de matériaux métalliques et diélectriques. Des exemples de composants HF réalisés par jet d'encre seront présentés et les avantages et les inconvénients du jet d'encre seront passés en revue.

D'une manière détaillée, le début de ce chapitre se concentrera sur les technologies jet d'encre, LTCC et HTCC après avoir rapidement décrit les procédés de prototypage rapide, la combinaison de fabrication additive et de jet d'encre pourra se révéler originale et intéressante. Le procédé de fabrication et les différentes spécificités seront décrits afin de mieux cerner les avantages et les contraintes associés notamment vis à vis des technologies LTCC et HTCC.

Ce chapitre se poursuivra par une description plus détaillée de la technologie stéréolithographie (microstéréolithographie) actuellement en développement à Limoges, avec les étapes de fabrication. Son utilisation servira pour la fabrication de plusieurs résonateurs présentés dans ce travail tout d'abord pour des résonateurs fixes puis enfin accordables.

Enfin, dans un objectif plus perspectif, un panorama des systèmes d'accord en fréquence sera présenté dans le but d'imaginer des solutions permettant à terme de rendre accordable des composants HF imprimés par jet d'encre.

II. Les technologies de fabrications céramique multicouches et multimatériaux

Les céramiques sont présentes dans des applications et domaines différents comme le secteur nucléaire, spatial, informatique, médical. Les progrès de la science des matériaux ont élargi le champ des propriétés pour ces applications : propriétés électriques, magnétiques, optiques, piézoélectriques, mécaniques, nucléaires, etc, ainsi que la nature des matières premières, des oxydes et des non-oxydes (carbures et nitrures).

Une céramique est un matériau inorganique, non métallique, poly ou mono cristallin présentant une structure complexe, et qui est obtenu classiquement par l'action d'un frittage.

Il existe de nombreuses céramiques et de nombreux procédés pour l'élaboration de circuits multicouches, ces procédés appartiennent souvent à la famille du prototypage rapide.

Le prototypage rapide (PR) intègre trois notions essentielles : le temps, le coût et la complexité des formes. Avec ces technologies, nous sommes capables de fabriquer des structures complexes en production rapide et avec de nombreuses variantes en s'éloignant du principe des moules traditionnels. Parmi ces technologies, on trouve : la LOM (Laminated object manufacturing), la SLS (Selective Laser Sintering), la FDM (Fused Deposition Modeling), la Stéréolithographie, la 3DP (Impression 3D) et l'Impression par jet d'encre.

Quand on décide de profiter des avantages du PR, le défi est de choisir le bon processus pour la tâche envisagée. Le choix entre les technologies diverses de PR peut être délicat ; pour correctement choisir la méthode de prototypage rapide pour une application spécifique, il faut bien comprendre aussi bien les limitations que les capacités de chaque technologie.

Avec les méthodes de prototypage rapide, on vient tout d'abord concevoir notre structure à l'aide d'un logiciel de conception spécifique qui va générer un fichier CAO qui représente la structure à fabriquer en 3D. Cette étape qui précède la fabrication nous permet de gagner de temps par rapport aux technologies classiques mais surtout de corriger toutes les erreurs avant de passer à l'étape suivante [1].

Le schéma (Figure I-1) présente les étapes principales de cette fabrication.

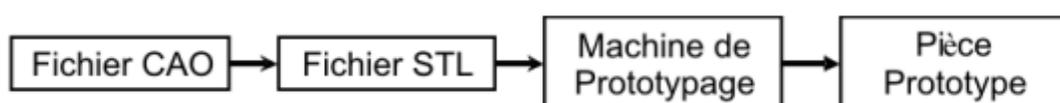


Figure I-1 : Schéma de principe de Prototypage Rapide (PR)

Chapitre I – les technologies Céramiques multicouches pour l'électronique

Chaque technologie présente des avantages et des inconvénients qui seront évalués et comparés, et notre choix pour la technologie jet d'encre et la technologie stéréolithographie sera argumenté. Tout d'abord plusieurs techniques de PR sont présentées (Tableau I- 1) :

Technique	précision (mm)	coût	avantages	inconvénient	Points forts
Stéréolithographie	Bien	+++	-relativement précise -réalisation de complexes structures	-production de séries limitées	- rapidité, - précision
Inkjet	Très bien	+++	-précision -surface finale	-fragile	- précision, - finition, - office OK ¹
FDM	Faible	+	-rapide, -pas de pollution - utilise des matériaux peu coûteux	- petites séries mal produites	- Office OK ¹ - coût matériaux
SLS	Bien	+++	- propriétés mécaniques des matériaux	- précision - grand % de porosité - très complexe	- coût matériaux,
LOM	Faible	+	- rapide - précision d'environ 10% du total des dimensions.	- finition - précision	- Office OK ¹ , - coût - dimension
3D printers	Faible	+	-fabrication rapide -faible coût des matériaux	- compatibilité avec peu de céramiques	- vitesse - office OK ¹ - coût
Direct writing	Très bien	++++	- effet d'auto alignement - effet de la sculpture latéral.	- lente - chère	- précision - matériaux
Lithographie classique	Très bien	++	- précision 5nm	- banc de travail de l'ordre de quelques mm	- Office OK ¹ - coût, - matériaux

Tableau I- 1 : Les technologies de rapide prototype

⁽¹⁾Office OK : ne nécessite pas d'environnement de type salle grise ou blanche.

II.1. Stéréolithographie (SLA)

Développée en premier lieu par J.C. André au laboratoire du DCPR, à l'ENSIC [2] puis par Charles W.Hull [3], la stéréolithographie 3D est l'un des premiers procédés de prototypage rapide à avoir été commercialisé [4](Figure I-2).

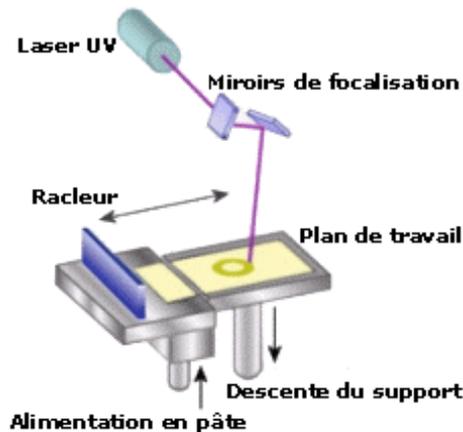


Figure I-2 : Technologie stéréolithographie [6]

La méthode repose sur le durcissement localisé d'un liquide organique (monomère) par photo polymérisation, à l'aide d'un laser ultraviolet. Le passage piloté du faisceau au sein de la résine va solidifier celle-ci in situ, et former au sein du bain liquide, un modèle tridimensionnel solide. Il y a autant de cycles que de nombre de couches nécessaires pour obtenir l'intégralité du volume de l'objet. En termes d'avantages, on retrouve la possibilité de fabrication d'objet 3D de petite ou grande taille, un choix intéressant de matériaux (plastique ou céramique), la possibilité de détails fins et un meilleur état de surface que les autres techniques de PR proche (SLS, FDM) pour les matériaux céramiques denses. Elle est compatible avec un choix de matériaux assez vaste (monomère, monomère chargés en céramique) et les précisions de fabrication dépendent principalement des matériaux utilisés (de quelques dizaines de μm à $10\mu\text{m}$).

II.2. Jet d'encre

Comme sur une imprimante jet d'encre classique (Figure I-3), des buses projettent une encre sur un support. Celle-ci est constituée typiquement d'une solution à base aqueuse contenant des particules diélectriques ou métalliques (encre conductrice).

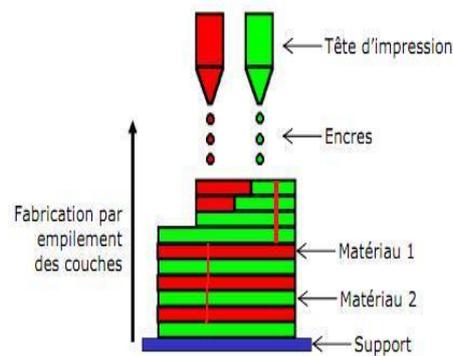


Figure I-3: Technologie jet d'encre.

Une tête d'impression regroupant une à plusieurs dizaines (voire centaines) de buses se déplace selon les axes X et Y (plan de travail) et éjecte de l'encre dans des endroits précis selon le logiciel de pilotage de l'ensemble. Cette étape pour imprimer une couche peut être répétée pour l'obtention de pièce finale qui peut être mono ou multicouches, le support de fabrication ou la tête d'impression sont mobiles. Les avantages de cette approche sont la précision (les gouttes sont déposées à +/- quelques μm) et la possibilité d'utiliser plusieurs matériaux dans une même pièce (métal, diélectrique). Les retraits différentiels et les problèmes de cocuisson nécessitent cependant une définition pensée de règles de design et la recherche de matériaux à température de cuisson et retraits compatibles.

Pour conclure :

- La stéréolithographie permet la réalisation d'objet 3D complexe en céramique (excellente propriété RF pour l'objectif de cette thèse) avec une précision suffisante pour l'application de couches de blindage métalliques (50-100 μm) et un état de surface correct (rugosité $\sim 1\mu\text{m}$).
- La technologie jet d'encre présente la propriété d'imprimer des structures multicouches et multi-matériaux ce qui est extrêmement intéressant pour la réalisation de composants RF qui seront conçus dans ces travaux de thèse. Pour cette dernière, une présentation plus détaillée est faite dans la partie suivante, suivie d'une comparaison avec une technologie de fabrication multicouche d'objets métallo-diélectrique très proche : la technologie LTCC.

Cette comparaison sera l'occasion de mettre en avant les points forts de la technologie jet d'encre, points sur lesquels nous nous appuyerons pour proposer des composants HF plus intéressants que s'ils étaient fabriqués par LTCC.

III. Les technologies multicouches

III.1. La technologie jet d'encre

Ce procédé repose sur une méthode de fabrication des structures bi-ou tridimensionnelles par dépôts de microgouttelettes d'encre éjectées par l'intermédiaire d'une buse. Cette encre est réalisée par des différentes étapes pour former des suspensions céramiques, métalliques [5, 6,7] et autre [8].

III.1.1. Présentation du jet d'encre

Comme pour toutes les technologies de prototypage rapide, la technologie jet d'encre permet la fabrication de pièces 2D et 3D couche par couche à partir d'un fichier numérique CAO dans lequel le modèle de la pièce est tranché numériquement.

Le dépôt direct d'encre s'effectue sans contact ce qui permet de ne déposer que la quantité de matériaux nécessaire. Cette technologie présente les différents modes classiques de fonctionnement des imprimantes : le jet continu (« CIJ :Continuous Inkjet Coding »), la goutte à la demande (« DOD : Drop on Demand »). Ces deux grandes catégories de procédé jet d'encre sont organisées de la manière suivante (Figure I-4):

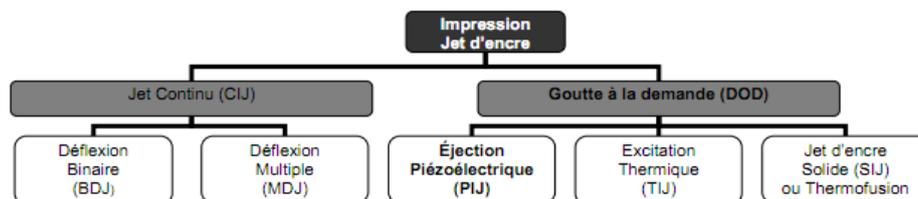


Figure I-4: Organigramme des technologies Jet d'encre

III.1.1.1. Le jet continu (« CIJ »)

Le jet continu [9] consiste en la formation de gouttes à fréquence régulière par fractionnement d'un cylindre de liquide sous l'effet d'une perturbation (figure 9). Ces gouttes peuvent être chargées ou non en sortie de buse par le passage à proximité d'une électrode. Les gouttes chargées seront ensuite déviées lors de leur passage entre deux plaques de déflexion, ce qui permet de faire le tri entre les gouttes qui doivent être imprimées et celles qui sont recyclées. L'impression en mode continu est principalement utilisée pour des applications graphiques à grande vitesse telles que l'impression textile ou l'étiquetage

- Déflexion binaire

Dans le procédé à déflexion binaire (Figure I-5), seules les gouttes non chargées sont destinées à atterrir sur le substrat. La trajectoire des gouttes chargées est déviée, à travers un champ électrostatique, vers un réceptacle permettant de recycler les gouttes non utilisées.

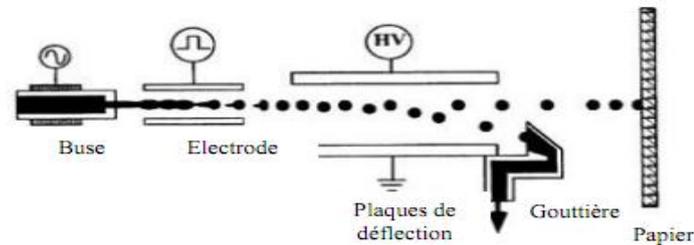


Figure I-5: Jet d'encre continu à déflexion binaire [9]

- Déflexion multiple

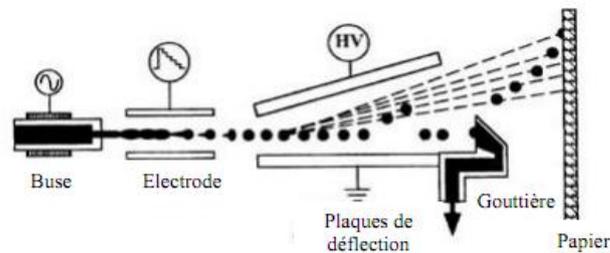


Figure I- 6: Jet d'encre continu à déflexion multiple[9]

Dans le procédé utilisant la déflexion multiple (Figure I- 6), les gouttes non chargées sont récupérées directement dans la gouttière de recyclage, alors que les gouttes chargées sont plus ou moins déviées en fonction de la charge portée, vers une position précise du substrat.

Ce système permet des cadences élevées, cependant des résultats de meilleure qualité, en termes de positionnement, sont obtenus par le procédé DOD qui est, de ce fait, le plus développé.

III.1.1.2. Goutte à la demande (« DOD »)

Dans le cas de l'impression de type goutte à la demande, le dépôt de la goutte sur le support est réalisé en plaçant la tête d'impression à l'endroit désiré avant éjection de la goutte. Le procédé à la demande forme uniquement les gouttes nécessaires à l'impression, en créant une onde de pression dans un canal contenant un liquide, ce qui entraîne l'expulsion d'une goutte à travers un orifice. Les trois principales méthodes d'éjection à la demande sont le procédé thermique, le procédé piézoélectrique, et la thermofusion [10].

- Le procédé thermique

Ce procédé consiste à chauffer localement un liquide à l'aide d'une résistance chauffante pour créer une surpression. La chambre contenant le liquide est maintenue à une pression proche de la pression de vapeur saturante du liquide à éjecter [11] (Figure I- 7). La bulle ainsi formée crée une surpression dans le canal et pousse le ménisque à travers l'orifice de sortie pour former une goutte de volume équivalent à la bulle formée.

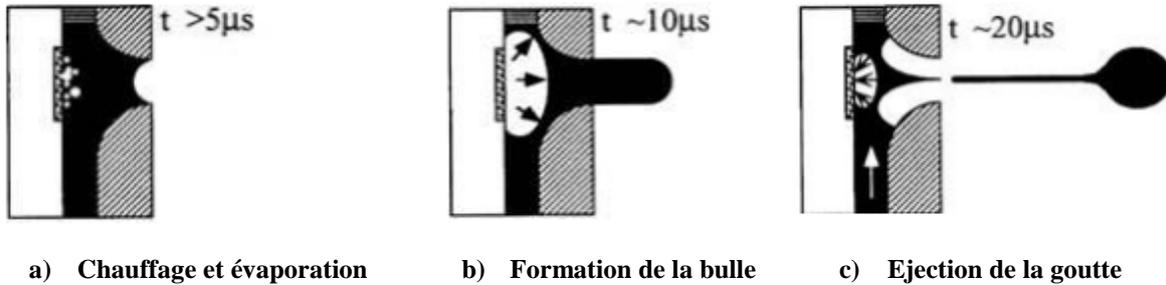


Figure I- 7: Schéma de fonctionnement du jet d'encre thermique

Avec ce type d'imprimante jet d'encre, le volume des gouttes dépend de la quantité de chaleur nécessaire pour vaporiser le liquide, ce qui ne le rend compatible qu'avec des matériaux qui ne craignent pas des contraintes thermiques trop importantes.

- **La thermofusion**

Ce procédé est basé sur le principe de solidifier l'encre à la température ambiante après avoir été chauffée afin d'être éjectable. Au contact du substrat, l'encre se solidifie et donne une très bonne qualité d'impression.

- **Le procédé piézoélectrique**

Ce procédé est basé sur un phénomène de piézoélectricité inverse, lors duquel un matériau se déforme mécaniquement sous l'effet d'un champ électrique (Figure I- 8). Les murs des buses, taillées dans une céramique piézoélectrique, se déforment sous l'effet d'un champ, ce qui crée une surpression dans le liquide et permet la formation d'une goutte au niveau de l'orifice de sortie [12].

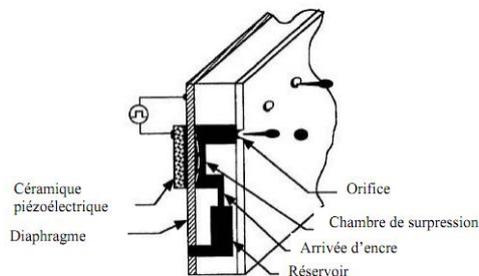


Figure I- 8: Configuration d'une tête piézo-électrique [10]

L'avantage de ce procédé est qu'il est purement mécanique (éjection des gouttes), ce qui n'impose pas de contrainte de température sur les matériaux utilisés comme le procédé thermique.

III.1.2. Les différentes solutions éjectées par la technologie jet d'encre

Cette technologie est utilisée dans plusieurs domaines d'application (biologie, micro électrochimique, ...) ce qui nécessite l'utilisation de différents type d'encre en fonction des éjections soit de poudres en suspension, soit de polymères, de sels inorganiques, de cire

III.1.2.1. Ejection de poudres en suspension

Une suspension pour jet d'encre doit respecter deux critères essentiels, à savoir une taille de grains adaptée et une bonne stabilité dans le temps. Concernant le premier point, la poudre éjectée doit en effet passer à travers les buses d'impression : elle doit donc présenter une granulométrie compatible avec le diamètre d'ouverture de ces dernières.

Dans le cadre du procédé d'impression jet d'encre, on distingue deux types de suspensions, en fonction du véhicule organique utilisé : les suspensions volatiles et les suspensions non volatiles.

a. Les suspensions volatiles

Une suspension destinée au jet d'encre est typiquement constituée des éléments suivants :

- La poudre
- Le solvant
- Un agent dispersant
- Le liant
- Des ajouts chimiques éventuels (tensioactif, anti-moussant)

L'ensemble de ces éléments organiques (hors poudre) de par leur nature rend cette solution volatile.

L'éjection de poudres céramiques ou métalliques en suspension dans un solvant volatile par un procédé jet d'encre conduit à un empilement de grains qui donne directement la forme de l'objet désiré.

La Figure I- 9 suivante présente quelques structures fabriquées avec une suspension volatile.

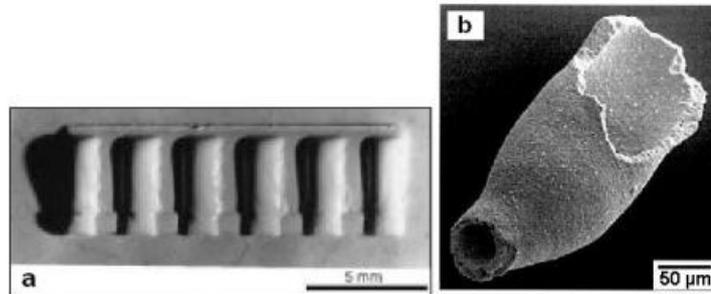


Figure I- 9 : Exemples d'objets obtenus par impression jet d'encre à partir de suspensions volatiles. (a) pièce de zircone tridimensionnelle [13], (b) morceau de pilier creux réalisé à partir d'une suspension micronique de PZT(Titano Zirconates de Plomb)[14]

b. Les suspensions non volatiles

Pour ce type de suspensions, initialement développées pour des applications de pur prototypage, le véhicule organique est une cire thermofusible [15,16]. Le réservoir ainsi que la tête d'impression sont donc chauffés au-dessus de la température de fusion de ces cires pour pouvoir les éjecter sous forme de gouttelettes, avant qu'elles soient refroidies rapidement à leur impact sur un substrat froid (Figure I- 10).

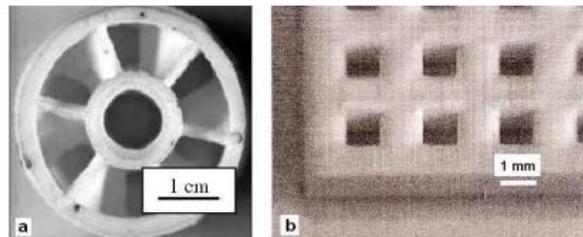


Figure I- 10: Photographies d'objets obtenus par impression jet d'encre à partir de suspensions non volatiles : (a) pièce en Alumine réalisée par impression jet d'encre [15]; (b) pièce en Alumine avant frittage.

III.1.2.2. Ejection de polymères

L'impression est utilisée dans les domaines de l'optique [17] à l'électronique [18] jusqu'à des applications dans le domaine du vivant avec l'impression d'encre organiques et polymériques.

Dans tous les cas, il est préférable pour l'éjection de composés organiques et polymériques d'utiliser des buses de type piézoélectrique car elles ne nécessitent pas de chauffer l'encre, qui peut être sensible à une élévation de la température. Cette impression est

en plein essor actuellement de par sa grande résolution et sa capacité «multimatériaux » dans le domaine de l'affichage par diodes lumineuses, les PLED (Polymer Light-Emitting Diodes) [19], dans lesquelles ce sont des polymères qui émettent la lumière (Figure I- 11).

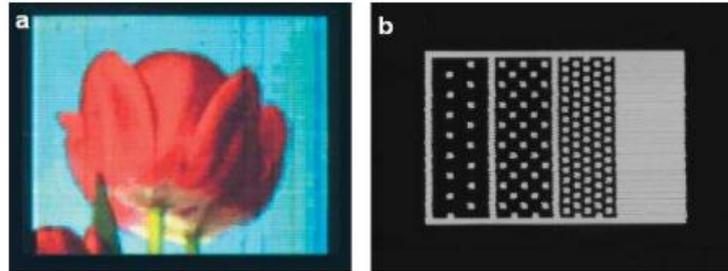


Figure I- 11 : Exemples de motifs réalisés avec des PLED par impression jet d'encre : (a) multicolore ; (b) en niveaux de gris

III.1.2.3. Ejection de sols inorganiques

Atkinson et al.[20] ont décrit l'utilisation de sols à base de précurseurs de pigments pour la décoration de pièces céramiques « traditionnelles » (assiettes, tuiles, ...) : ce sol est éjecté par un système continu sur l'objet, suivant un motif défini par ordinateur, puis les précurseurs forment un gel, une fois l'eau évaporée. La pièce décorée subit alors un traitement thermique à une température généralement inférieure à 1000°C, pendant lequel les pigments prendront leur couleur définitive.

III.1.3. Les applications

La technologie jet d'encre est utilisée dans différents domaines grâce à son aspect multicouche et la possibilité d'imprimer différents types de matériaux comme il a été présenté dans le paragraphe précédent.

L'ensemble des avantages du procédé jet d'encre a poussé industriels et laboratoires à explorer les faisabilités pour de nombreuses applications dans des domaines aussi divers que l'électronique organique [21], les biotechnologies [22], l'optique-photonique [23, 24], le micromoulage, la microstructuration [25, 26], les MEMS, ou la nanofabrication 3D de composants céramiques [27].

Le domaine des composants et circuits électroniques fait tout particulièrement appel aux polymères conducteurs. L'avantage de ces derniers sur une approche classique de photolithographie repose sur le nombre limité d'étapes de fabrication ainsi que leur faible coût et les surfaces imprimées qui peuvent être importantes. Actuellement, ils sont cependant

moins efficaces en termes de rapidité et de précision et sont plutôt utilisés lorsque le coût et les surfaces imprimées sont privilégiés devant la précision.

Un exemple de l'utilisation de la technologie jet d'encre (Figure I-12) dans l'électronique a été présenté par le Pr. Manos Tentzeris qui a imprimé des résonateurs et des antennes sur du papier avec une très bonne valeur de conductivité de $20 \text{ S}/\mu\text{m}$ [28].

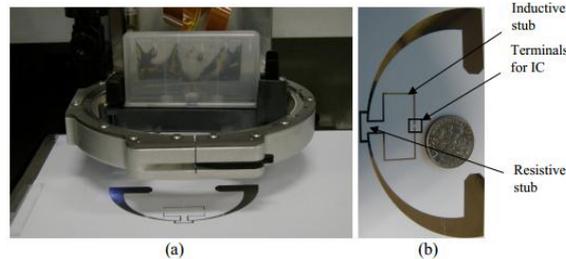


Figure I-12 : (a) antenne RFID imprimée par jet d'encre sur un papier (b) antenne après impression

Un autre exemple de l'utilisation de la technologie jet d'encre (Figure I- 13) est dans le domaine du filtrage. Dans cet exemple, le Pr. Manos Tentzeris a utilisé cette méthode pour imprimer des filtres multicouches constitué de couches de papiers [29].

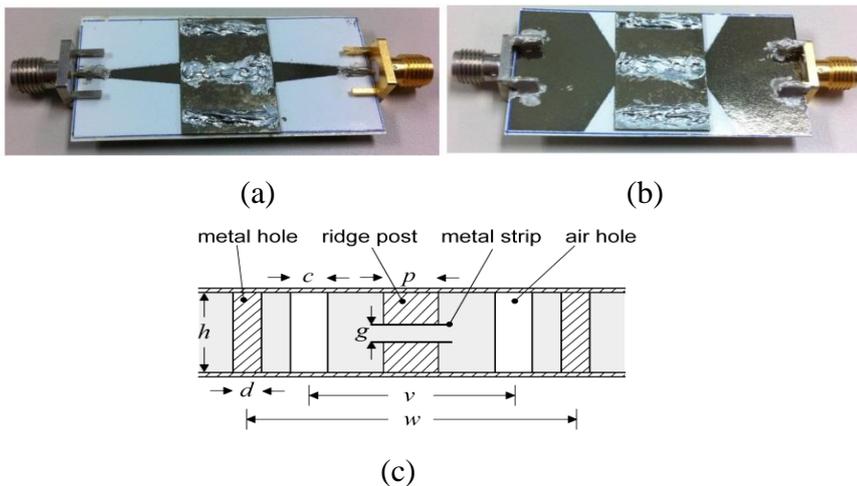


Figure I- 13: (a) filtre SIW, vue dessus (b) vue dessous (c) vue des couches

III.2. Le procédé LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic)

Les procédés de technologies multicouches « High and Low Temperature Co-fired Ceramic » sont apparus vers le début des années 1990. Ils consistent à empiler des plaques diélectriques (céramique), préalablement munis de motifs conducteurs, de résistances, de capacités, et de trous métallisés (vias) pour les connexions entre plaques. Après laminage, elles subissent un traitement thermique sous atmosphère pour la soudure aux interfaces.

III.2.1. Présentation du procédé LTCC

La technologie Low Temperature Cofired Ceramic permet de produire des circuits multicouches à partir de simples feuilles de céramique laminées ensemble et cuites en une seule étape. La mise au point des matériaux LTCC ayant une température de cuisson inférieure à 1000°C a permis l'utilisation de métaux faiblement résistifs comme l'or, le Cuivre et l'argent et donc d'améliorer les performances des circuits réalisés. A contrario les matériaux à haute température (HTCC) ne peuvent être compatibles qu'avec des métaux dont la conductivité est moins bonne, comme le Palladium avec une conductivité théorique de 9,5 S/μm qui les rendent moins intéressants pour les applications à hautes fréquences.

Le Tableau I- 2 compare les différences entre la technologie LTCC et HTCC.

	HTCC	LTCC
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> -Technologie très mature - films minces en multicouches - Hermétique - Coût de fabrication faible 	<ul style="list-style-type: none"> - Haute reproductibilité - Films minces en multicouches - Hermétique - Composants passifs intégrés - faible température des métaux (Cu, Au, Ag, ...) - Applications millimétriques
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Non conformable - Plaque de 4 pouces x 4 pouces - Cofrittage à 150°C - haute température des métaux (W, Mo, ...) - Applications basses fréquences RF 	<ul style="list-style-type: none"> - Non conformable - Plaque de 4 pouces x 4 pouces - Cofrittage à 850°C - 2 fois le coût du HTCC - 20% de retrait après cofrittage

Tableau I- 2: comparaison des technologies LTCC et HTCC

Nous aurions également pu présenter la technologie LCP qui est aussi un procédé multicouche qui demande un laminage des couches à 285 °C et qui autorise l'usage de métaux à faible température. Cette technologie, bien adaptée aux applications RF et millimétriques, est de maturité moyenne avec quelques problèmes d'herméticité et de souplesse des matériaux

[30]. De plus, comme nous nous sommes focalisés sur les technologies céramiques, nous ne poussons pas plus loin la comparaison de cette technologie avec celle du LTCC et HTCC.

Les procédés de fabrication d'une structure LTCC varient peu selon les fabricants. (Voir Figure I- 14).

On commence par la préparation du matériau où les feuilles de céramique sont déroulées et découpées au format du circuit avec un laser ou par découpe mécanique. Puis on passe au perçage des trous et les cavités sont ouvertes dans les couches concernées. Cette étape est réalisée par poinçonnage ou usinage laser. Les trous percés à l'étape précédente sont remplis avec une encre conductrice en utilisant un pochoir (technique de sérigraphie). Pour faciliter le remplissage des trous par l'encre, le diamètre des vias doit être supérieur à l'épaisseur de la couche de céramique. Dans certains cas, une pompe peut être placée sous la couche pour faciliter le remplissage. Les vias formés vont permettre de connecter les couches électriquement entre elles.

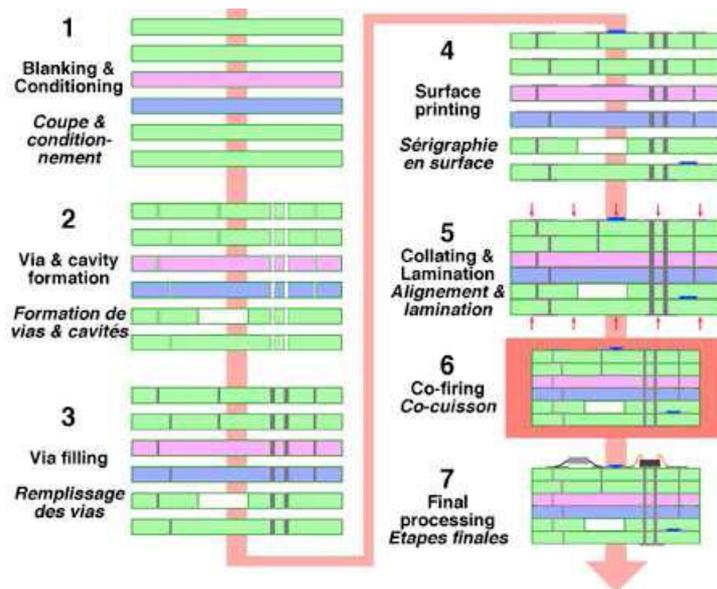


Figure I- 14 : Description des étapes de la chaîne de fabrication

Les lignes conductrices, les composants passifs et les plans de masse sont imprimés sur chaque feuille avec le même procédé que pour le remplissage des trous. Les feuilles sont ensuite séchées dans une étuve. A ce stade, toutes les couches peuvent être contrôlées visuellement et électriquement avant de passer à l'étape suivante.

Après alignement et laminage des couches en un objet, une seule cuisson est nécessaire pour toutes les couches. Les matières organiques contenues dans le matériau LTCC

sont brûlées à une température de 900°C. A cette étape, les couches de LTCC forment un bloc compact et rigide.

Pour une température de cuisson au-dessus de 1000°C on parle de procédé céramique à haute température (High Temperature Cofired Ceramic HTCC) et de procédé céramique à basse température (Low Temperature Cofired Ceramic LTCC) pour des températures inférieures à 1000°C (typiquement 850°C).

III.2.2. Les applications

La technologie LTCC peut être appliquée dans les systèmes de radar, la communication médicale sans fil haute fréquence, les circuits numérique/analogique, les satellites et des applications militaires diverses [31]. Cette technologie est largement utilisée dans la fabrication de dispositifs haute fréquence comme le Bluetooth, les modules d'antenne, des émetteurs, des amplificateurs de puissance [32], des filtres, des commutateurs de duplexeurs et d'autres applications (Figure I- 15).

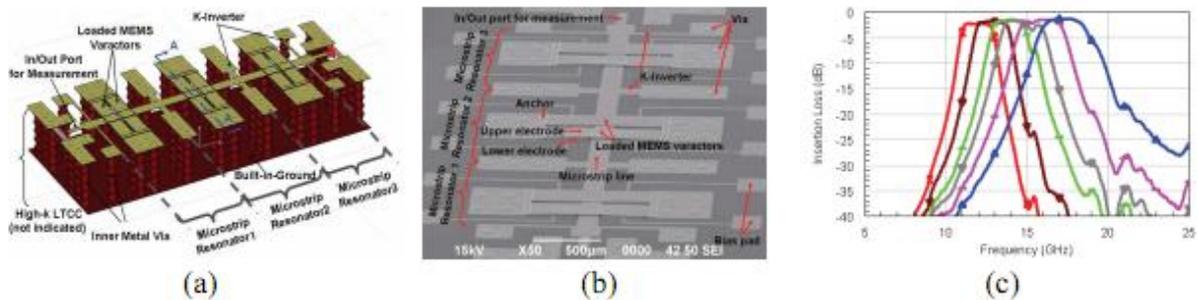


Figure I- 15: (a) Modèle 3D du filtre accordable; (b) Une Photographie SEM; (c) Réponses EM en transmission entre 12 GHz et 17,3 GHz [33]

Cette technologie permet de fabriquer des structures jusqu'à 150 GHz [34], grâce à la précision de cette dernière, aux faibles tangentes de pertes des matériaux à basse température de frittage et aux très bonnes conductivités des métaux disponibles.

III.3. Comparaison entre les deux technologies

Après avoir révolutionné le monde de l'impression graphique en s'imposant comme une rupture technologique, le procédé jet d'encre est actuellement en pleine expansion dans divers domaines.

L'impression jet d'encre présente divers avantages parmi lesquels le fait d'être une méthode sans contact qui limite la perte de matière ; elle permet la réalisation de structures composites en utilisant un dispositif multibuses et ce sur une même couche, ou bien avec une

évolution de composition d'une couche à une autre. Enfin, elle présente une haute définition, directement liée à l'ouverture de la buse et donc vouée à suivre l'évolution spectaculaire du domaine de l'impression. Par ailleurs, il est possible par ce procédé de fabriquer aussi bien des objets à deux dimensions (films continus ou non) qu'à trois.

Il est possible d'imprimer sur tous types de substrats : organique ou non, rigide ou souple. Enfin, c'est un procédé numérique pour lequel la simple modification d'un fichier informatique permet d'imprimer différents motifs, au contraire de la photolithographie qui nécessite la fabrication d'un masque ou des procédés d'impression par sérigraphie ou offset eux-mêmes demandant respectivement la réalisation d'écrans ou de formes imprimantes. Il s'agit donc d'un bon candidat en tant que prototypage rapide.

La durée d'impression nécessaire augmente fortement en raison de la multiplication du nombre de passages de la tête d'impression aux différents endroits. Ce qui est un des inconvénients de cette technologie en plus de la faible épaisseur d'une structure complète qui est de l'ordre de $100\mu\text{m}$ pour des structures multicouches (plusieurs centaines de μm au mieux).

Par rapport à la technologie LTCC, qui est quasiment une technologie multicouche et multi-matériaux (un métal et un ou deux diélectriques), cette technique est assez simple à mettre en œuvre. Elle permet le dépôt de nombreux types de matériaux, une bonne adhérence des dépôts, un bon pouvoir de recouvrement, une faible porosité de la couche diélectrique, et une homogénéité des couches construites.

Les principales difficultés rencontrées avec ce procédé sont essentiellement liées aux phénomènes de rétrécissement des couches et de dilatation thermique inter-couches qui se répercutent sur les précisions d'alignement et de superposition. L'équipement nécessaire pour la fabrication est très coûteux, en conséquence, la technologie LTCC est plutôt destinée à la production de grandes séries permettant de réduire le coût unitaire des objets fabriqués.

La technologie LTCC impose des règles de dessin comme une distance minimale entre 2 vias égale à 2,5 fois le diamètre du via, une distance minimale entre le centre d'un via et le bord de la structure égal à 3 fois le diamètre du via. Cette technologie est de plus capable de réaliser un mur métallique continu (remplacé par des murs de vias), et impose des règles de dessin qui sont au final plus contraignantes que ce que l'on peut espérer avec le jet d'encre. Enfin, les procédés LTCC standards ne permettent que l'utilisation d'un seul matériau diélectrique en une couche continue, ce qui élimine la possibilité d'avoir des contrastes diélectriques localisés [35].

Malgré tout, et en particulier pour la réalisation des composants RF comme des fonctions de filtrage, jet d'encre et LTCC sont extrêmement proches en matière de procédés de fabrication. Pour cette raison, dans le chapitre suivant, la technologie jet d'encre sera évaluée et comparée à la technologie LTCC au travers de structures choisies pour les mettre en compétition.

IV. Les filtres microondes

Un filtre idéal est un système qui transmet sans déformation tout signal dont la zone utile sera dans un intervalle de pulsation (ω_1 et ω_2) et élimine tout signal hors cet intervalle. Suivant cet intervalle, on peut définir le type de ce filtre.

Un filtre microonde passe bande idéal est un quadripôle permettant de laisser passer les fréquences comprises dans cet intervalle appelé bande passante. Pour les filtres, on cherche à trouver un gabarit le plus proche de celui considéré idéal, les gabarits des filtres définissent les valeurs acceptables pour une fonction de filtrage donnée.

Il existe trois principales fonctions de filtrages : Les filtres Butterworth [36], les filtres Tchebychev et les filtres Elliptique : meilleure réjection en limite de bande passante, la présence de zéros de transmission en dehors de la bande conduisant à une rejection optimale

Le rôle d'un filtre dans les systèmes est fondamental puisqu'il permet de débarrasser d'un signal utile toutes les composantes parasites, qui peuvent provenir de sources diverses. Pour cela, on définit différents critères pour bien choisir les topologies et technologies pour réaliser le filtre désiré.

La conception d'un filtre consiste dans un premier temps à déterminer une fonction de transfert permettant de satisfaire les propriétés électriques imposées par le cahier des charges. Les spécifications d'un filtre sont généralement données à partir d'un gabarit. Ce dernier renseigne sur le type du filtre et les caractéristiques électriques auxquelles il doit répondre. Mais aussi d'autres critères sont très importants pour la fabrication d'un filtre, surtout au niveau des critères physiques et économiques.

Dans le chapitre III, nous travaillerons en particulier sur le critère physique pour diminuer la taille tout en gardant les mêmes propriétés électriques pour un filtre donné.

Ces critères sont dans l'ordre:

1. Electrique : Largeur de la bande passante, fréquence centrale, ondulation du paramètre de transmission dans la bande, atténuation hors bande, pertes dans la bande passante, adaptation dans la bande et temps de propagation de groupe.
2. Physique : Encombrement, masse, tenue en puissance, stabilité mécanique, taille, dimensions et sensibilité en température.
3. Economique : Coût de conception, coût de production et possibilité d'adaptation à plusieurs standards.

Lors de la conception d'un filtre, le choix de la topologie et de la technologie de réalisation est lié aux propriétés électriques et aux caractéristiques physiques qu'exige son application. Il existe différentes approches pour la réalisation de filtres hyperfréquences dont une qui est présentée dans le paragraphe suivant.

IV.1. Optimisation du filtre: Utilisation des paramètres de couplage extraits à partir de la matrice idéale

Après le choix du modèle de filtre analogique fait suivant les performances requises par le cahier des charges, on extrait les paramètres M_{ij} et K_{ij} de la matrice idéale de couplage. La matrice de couplage $[k]$ contient les valeurs de couplages entre les différents éléments résonants du filtre. Les coefficients de qualité extérieurs d'entrée Q_{ee} et de sortie Q_{es} représentent les couplages au niveau des systèmes d'excitation. Pour chaque fonction de transfert saisie, un logiciel développé à XLIM calcule la matrice de couplage $[M]$ et les résistances d'entrée R_e et de sortie R_s . Ces trois données sont normalisées par rapport à la fréquence centrale f_0 et la bande passante à équiondulation Δf . A partir de ces paramètres, on déduit les valeurs de deux éléments primordiaux pour la conception des filtres. Les coefficients de couplage inter-résonateurs k_{ij} sont reliés aux termes M_{ij} par l'équation :

$$k_{ij} = \frac{M_{ij} \otimes \Delta f}{f_0} \quad \text{Eq. 1}$$

Les coefficients de qualité extérieurs Q_{ee} et Q_{es} sont respectivement rattachés aux résistances R_e et R_s par les équations suivantes :

$$Q_{ee} = \frac{f_0}{R_e \otimes \Delta f} \quad \text{Eq. 2}$$

$$Q_{es} = \frac{f_0}{R_s \otimes \Delta f} \quad \text{Eq. 3}$$

Si le filtre est symétrique, les facteurs de qualité extérieurs d'entrée et de sortie sont identiques et les coefficients de couplage inter-résonateurs symétriques sont égaux.

IV.1.1. Facteur de qualité extérieur Q_{ext}

Le facteur de qualité extérieur nous permet de calculer la force de couplage entre les entrées/sorties et les résonateurs. Q_{ext} peut être extrait de la courbe de la phase du coefficient de réflexion S_{11} comme le montre la Figure I- 16 .

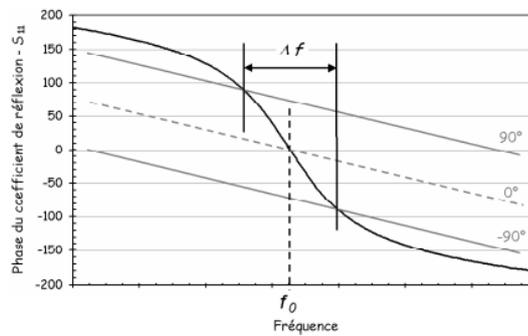


Figure I- 16 : Phase de S_{11}

Q_{ext} est calculé en suivant la formule suivante :

$$Q_{ext} = f_0 / \Delta f \quad \text{Eq. 4}$$

Avec Δf : la différence entre les deux fréquences correspondant aux valeurs de la phase (-90° ; $+90^\circ$).

IV.1.2. Couplages inter-résonateurs K_{ij}

Le coefficient de couplage inter-résonateur nous permet de calculer la force de couplage entre deux résonateurs adjacents.

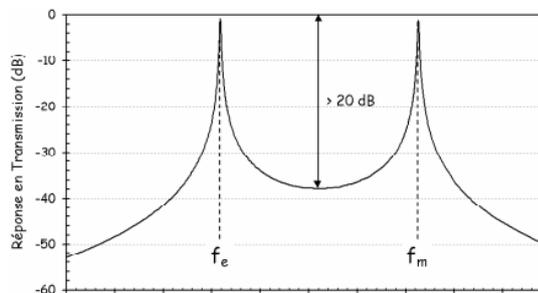


Figure I- 17 : Coefficient de transmission S_{12}

K_{ij} est calculé à partir de la formule de l'équation 5 en utilisant la réponse en transmission de deux résonateurs très peu couplés en entrée et sortie comme visible sur la courbe de la Figure I- 17.

$$k_{ij} = \frac{fm^2 - fe^2}{fm^2 + fe^2} \quad \text{Eq.5}$$

Ces différents calculs sont indépendants du filtre qu'il soit planaire, volumique ou quasi planaire. Ces paramètres associés au facteur de qualité à vide (Q_0) du résonateur nécessaire, définissent le type de résonateur (et donc de filtre) le plus adéquat pour répondre à un gabarit de filtrage donné tout en respectant les autres paramètres physiques visés (encombrement, masse, ...). Les premiers éléments fixés, il faut ensuite passer pour une phase d'optimisation des paramètres géométriques du filtre. Cette étude peut se faire par simulation EM du dispositif complet ou par l'appui de modèles équivalents à base d'éléments électriques, basiques (self inductance, condensateur, résistances, transformateurs).

IV.2. Les différentes technologies de filtre

Il existe trois grandes familles qui regroupent la fonction de filtrage: les filtres planaires, volumiques et accordables. Chaque technologie sera détaillée pour trouver les avantages et les inconvénients et choisir le type de filtre (et la technologie associée) à la performance de filtrage attendue.

IV.2.1. Les filtres planaires

Les technologies planaires consistent à utiliser un substrat qui se présente sous la forme d'une plaque de diélectrique. Des fines couches métalliques sont déposées sur l'une ou les deux faces du substrat.

L'épaisseur de substrat est de l'ordre de quelques dizaines de micromètre à plusieurs millimètres. Ce substrat est un diélectrique qui peut être organique (PTEE, téflon, ...) ou de nature inorganique cristalline (céramique de type Alumine par exemple).

Les critères de choix du substrat sont principalement les caractéristiques électriques du diélectrique (tangente de perte et permittivité), les caractéristiques thermiques et mécaniques (conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique), la technologie de fabrication utilisée (procédé de dépôt des couches métalliques) et bien sûr le coût.

Les couches de métallisation sont en général composées de conducteurs de type Cuivre, or ou argent sélectionnés pour leur excellente conductivité électrique. Elles sont déposées par laminage, pressage à chaud, sérigraphie, électrolyse ou dépôt auto-catalytique, et sont ensuite délimitées par différents procédés de gravure ou d'usinage surfaciques. Pour les technologies planaires, il existe 3 grandes familles qui regroupent plusieurs types des filtres.

Les filtres planaires présentent l'avantage d'un faible encombrement, d'une intégration totale à l'environnement électronique, d'un faible coût de production et d'une grande reproductibilité. Leur inconvénient majeur est leur faible facteur de qualité à vide des résonateurs qui réduit la sélectivité des filtres, ce qui engendre des pertes importantes.

Les filtres planaires sont plusieurs mais dans le paragraphe suivant, nous présentons les définitions des filtres planaires qui nous intéressent par la suite.

IV.2.1.1. Les filtres à lignes couplées

C'est la topologie la plus connue pour le filtrage faible bande. Ces filtres sont composés de lignes dont la longueur est $l=\lambda_g/2$ ou $l=\lambda_g/4$, λ_g étant la longueur d'onde guidée. L'ordre du filtre est égal à $N-1$ (où N est le nombre de lignes couplées). Pour de tels filtres le niveau de sélectivité est étroitement lié aux niveaux de couplages. Ces filtres sont par conséquent intéressants pour des applications haute fréquence où leurs dimensions sont très compactes. La largeur de la ligne détermine son impédance caractéristique.

Les filtres à lignes couplées sont basés sur des résonateurs linéiques couplés entre eux et chargés en leurs extrémités par des circuits ouverts ou des courts-circuits. La réponse du filtre dépend du nombre de résonateurs (ordre du filtre), des distances entre ces lignes (gaps) et des paramètres du substrat utilisé. Les topologies de filtrage les plus connues sont la topologie à couplage capacitif et la topologie à couplage distribué (couplage sur une longueur $\lambda_g/4$) présentées Figure I- 18.

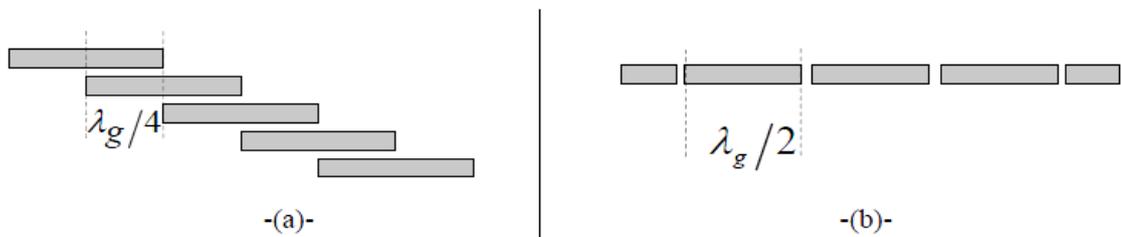


Figure I- 18 Topologies de couplage (a) Couplage distribué (b) Couplage capacitif

Le couplage distribué est plus fort que le couplage capacitif et permet d'avoir des bandes passantes plus larges. Par ailleurs il permet de réduire la taille du filtre de moitié par

rapport à un filtre à couplage capacitif. La synthèse de ces filtres a été introduite par S.B. Cohn [37]. Un autre type de filtre à résonateurs linéiques est le filtre en peigne (ou hairpin) [38, 39] présenté ci-dessous (Figure I- 19).Le couplage est de type distribué.

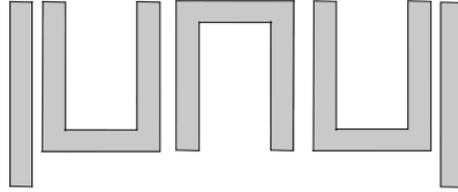


Figure I- 19 : Filtre hairpin

Un exemple de filtre hairpin est présenté par Yinqiao Li [40] avec un filtre 5 pôles fabriqué par la technologie LTCC. Ce filtre présente une fréquence centrale de 16,75GHz et de bande passante à équiondulation $\Delta f=2,94\text{GHz}$ ce qui donne un pourcentage de 18% avec des pertes d'insertion de l'ordre de $\sim 2,9$ dB avec un coefficient de réflexion autour de -15dB (Figure I- 20).

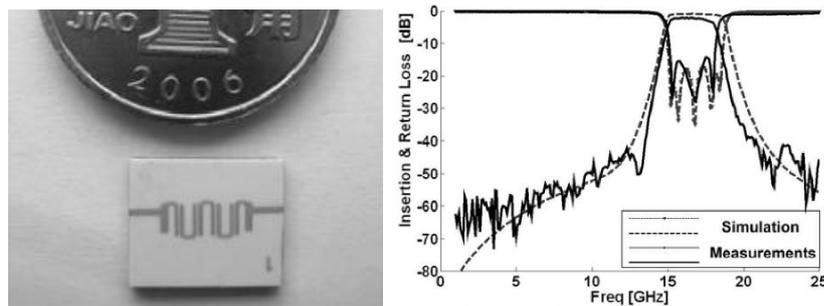


Figure I- 20 : (a) filtre hairpin LTCC ; (b) réponse de filtre en mesure et simulation

IV.2.1.2. Les filtres interdigités

Les filtres interdigités sont parfaitement adaptés aux bandes moyennes et larges du fait des forts couplages réalisables entre ses résonateurs. Cependant ce type de filtre n'exclut pas les réalisations bandes étroites, présentant même une variante bande étroite.

Ces filtres sont parmi les plus compacts, cependant ce sont aussi les filtres les plus sensibles aux dispersions de fabrication, que ce soit celle sur les vias ou celle sur les gaps.

Pour ce type de filtre, Zulkifli Ambak [41] a présenté un filtre multicouche à une fréquence centrale de 2,54GHz fabriqué par la technologie LTCC avec un substrat diélectrique Ferro A6S. Ce filtre présente des pertes d'insertion de 1,66dB avec un coefficient de réflexion de -10dB (Figure I- 21).

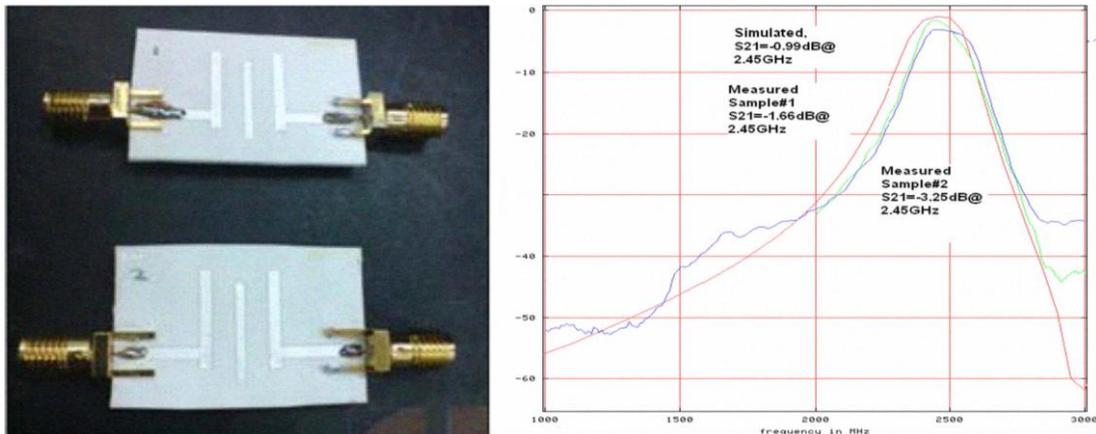


Figure I- 21 : (a) filtre fabriqué par la technologie LTCC, (b) réponse de filtre en S_{21}

Ce type de filtre planaire sera abordé en détail dans le troisième chapitre.

IV.2.2. La technologie multicouche

Il existe d'autres technologies planaires comme les technologies multicouches qui sont détaillées dans le chapitre III. Les technologies multicouches sont composées de différents niveaux de conducteurs et de diélectriques superposés et peuvent être utilisées soit en technologie microruban soit en technologie coplanaire ou en technologie triplaqué également.

L'utilisation de cette technologie offre de nombreux avantages par rapport aux technologies planaires classiques :

- La possibilité d'utiliser les différentes couches comme support des différents éléments, augmentant ainsi la compacité des systèmes et leur efficacité.
- Le fait de pouvoir réaliser des lignes partiellement couplées sur deux niveaux de métallisation différents afin d'atteindre des niveaux de couplage importants [42].
- L'utilisation de surcouches diélectriques permet l'égalisation des vitesses de phase entre les modes pairs et impairs des lignes couplées.
- Une augmentation de la gamme d'impédances synthétisables en combinant des approches lignes microruban sur substrat de faible épaisseur et lignes semi-coplanaires sur substrat de faible permittivité, il est possible alors d'obtenir des valeurs d'impédance très fortes ou très faibles.

Le principal inconvénient de cette technologie est la complexité du processus technologique par rapport aux technologies planaires classiques.

IV.2.2.1. Les filtres SIW

Pour le filtre SIW (Substrate Integrated Waveguide) classique, la cavité est extraite d'un guide de section rectangulaire dans lequel se propage une onde électromagnétique. Le SIW est basé sur la réalisation d'un guide d'ondes à l'intérieur d'un substrat diélectrique. Ce guide, rempli de diélectrique, propage le mode TE_{10} le long du substrat, c'est-à-dire que l'axe du guide est parallèle aux surfaces du substrat. On réalise une cavité fonctionnant sur le mode fondamental TE_{101} en délimitant la cavité à l'aide de vias.

Dans le début des années 1990, plusieurs tentatives sur des structures de guides d'ondes de forme plane ont été proposées. En 1994, un brevet japonais [43] est déposé sur l'idée d'un guide d'ondes rempli de diélectrique avec des trous d'interconnexion métalliques dans le substrat diélectrique pour le cloisonnement du champ.

Peu de temps après, un autre brevet US est déposé sur une structure de filtre multicouche de type LTCC [44]. Enfin, en 1997, une première utilisation de cette structure SIW dans le domaine millimétrique [45] avec la technologie LTCC est proposée.

Un exemple de l'application de cette technologie pour la fabrication de filtres SIW est présenté dans la Figure I- 22 avec un filtre 7 pôles [46] qui possède une fréquence centrale de 59,1 GHz et une bande passante $\Delta f = 11,8\%$ avec des pertes d'insertion de 2,4 dB.

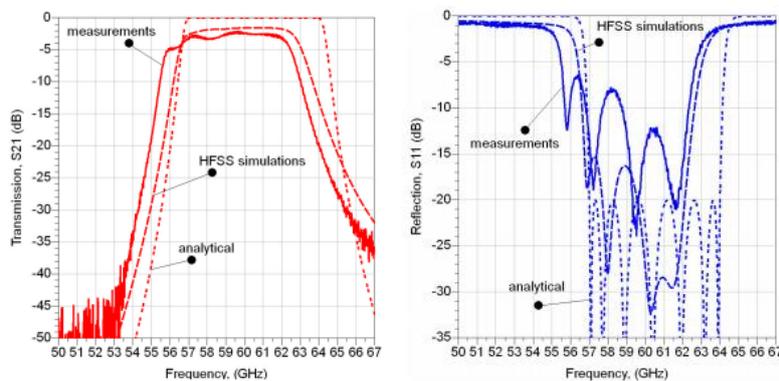


Figure I- 22 : réponse de filtre en mesure et simulation

IV.2.3. Les filtres volumiques

Les filtres à cavités sont surtout utilisés pour leurs excellentes performances électriques. Grâce à leur facteur de qualité très élevé, il est possible d'obtenir des filtres très sélectifs et à faibles pertes d'insertion. Par ailleurs, ils sont particulièrement intéressants pour les applications spatiales puisqu'ils peuvent supporter de fortes puissances.

Ces technologies sont les plus adaptées au filtrage à bande étroite pour les signaux de forte puissance. En contrepartie, le principal inconvénient des technologies volumiques réside dans leur encombrement et leur poids importants. De plus, les filtres volumiques sont complexes à mettre en œuvre, ils requièrent un traitement mécanique spécial et un réglage après réalisation. Cette procédure de réglage contribue fortement à une augmentation des coûts de production.

Il existe plusieurs types de filtres volumiques :

- Les filtres à cavités métalliques,
- Les filtres à résonateurs diélectriques,
- Les filtres à base de guides d'ondes.

IV.2.3.1. Les filtres à résonateurs diélectriques

Les filtres à résonateurs diélectriques exploitent des modes de résonance apparaissant à l'intérieur de blocs diélectriques de très forte permittivité et de différentes formes. Cette technologie est apparue vers la fin des années 60 avec l'utilisation de résonateurs en oxyde de Titane (TiO_2) avec de très forts facteurs de qualité ($Q_0 \sim 10\ 000$) [47]. Grâce à une tangente de pertes présentée très faible ($\tan\delta = 10^{-4}$).

La Figure I- 23 , montre un exemple de ce type de filtre. Le filtre 2 pôles est composé de deux résonateurs rectangulaires cylindriques avec une permittivité $\epsilon_r=38,6$. Les résonateurs fonctionnent sur un mode TE_{011} à 4 GHz.

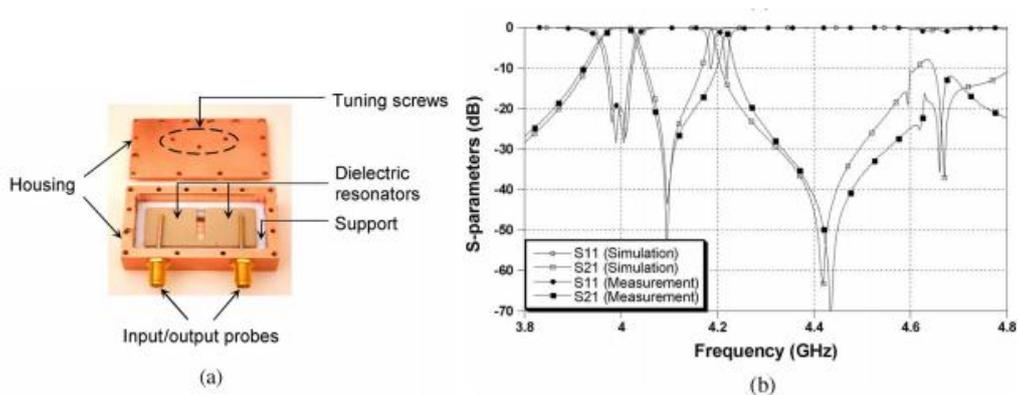


Figure I- 23: Filtre 2 pôles

Les conditions limites de ces résonateurs sont des murs magnétiques obtenus grâce à un fort contraste de permittivité entre le diélectrique et l'air. Ainsi, plus la permittivité du diélectrique est importante, meilleure est l'efficacité du mur magnétique. Il faut toutefois préciser qu'un tel mur magnétique est beaucoup moins localisé qu'un mur électrique réalisé

grâce à une paroi métallique. Ainsi, bien que le diélectrique présente généralement une forte permittivité (plusieurs dizaines), le champ électromagnétique n'est pas complètement confiné dans le diélectrique.

IV.3. Dispositifs microondes accordables

Pour répondre aux besoins de reconfigurabilité des systèmes d'émission-réception multibandes tout en évitant la multiplication des chaînes de transmission au sein d'un même système, plusieurs architectures radiofréquences reconfigurables ont été proposées.

La reconfigurabilité passe par des filtres accordables avec un contrôle de la fréquence centrale et de la bande passante qui permet une souplesse d'utilisation dans des applications commerciales, militaires, ou encore dans des systèmes de mesure [48, 49]

Plusieurs voies technologiques sont actuellement utilisées pour réaliser l'accord des dispositifs microondes à partir d'une commande électrique.

IV.3.1. Les transducteurs piézoélectriques

La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains matériaux à se polariser électriquement sous l'action d'une force mécanique (effet direct) et, réciproquement, à se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (effet inverse).

En 1880, les frères Pierre et Jacques Curie mettent en évidence que, dans certaines classes cristallines, l'application de contraintes sur le cristal entraîne l'apparition de charges électriques à sa surface (effet piézoélectrique direct), puis inversement, que l'application d'un champ électrique génère des déformations du cristal (effet piézoélectriques indirect). La première application de cet effet piézoélectrique est la réalisation d'une balance à quartz : la fréquence de vibration d'un cristal est modifiée par l'effet d'inertie d'une masse déposée à sa surface, et permet donc de mesurer cette dernière directement.

Dans le domaine microonde, le Pr. Mansour a présenté un filtre accordable 4 pôles composé de 4 résonateurs diélectriques avec une permittivité $\epsilon_r = 45$ et une tangente de pertes $\tan\delta = 10^{-5}$. Les résonateurs fonctionnent sur un mode TEM dual à une fréquence qui varie entre 5 et 4,7 GHz pour une Δf de 5,6% [50].

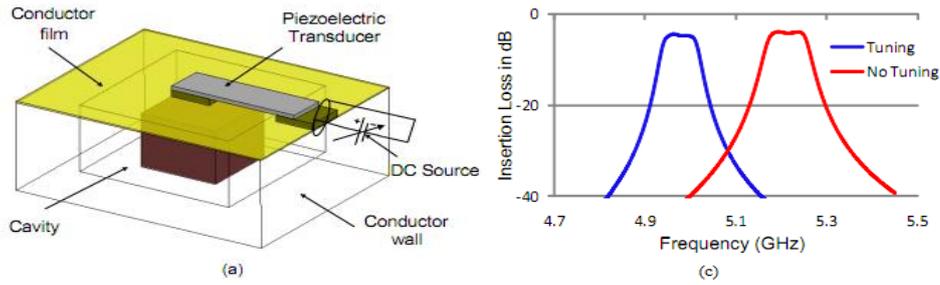


Figure I- 24: (a) Modèle HFSS, (b) Réponse du filtre

Ce filtre (Figure I- 24) possède un facteur de qualité à vide après fabrication proche de 500, des pertes d'insertion de 4,4 dB et d'un niveau de réflexion dans la bande de -10 dB autour de 5 GHz. En appliquant une tension continue, l'actionneur piézoélectrique se déforme en faisant varier la hauteur de la cavité, ce qui rend la structure accordable.

Un autre exemple de structure accordable par actionneur piézoélectrique est proposé par le Pr. William J. Chappell [51]. Le filtre présenté dans la Figure I- 25 démontre une accordabilité en fréquence de 2,71 GHz à 4,03 GHz avec une plage de la bande passante de 2,5%. En appliquant une tension qui varie entre -20 et 150 V, l'actionneur piézoélectrique se déforme pour arriver à un accord en fréquence de 32% avec un gap qui varie entre 15 et 30 μm .

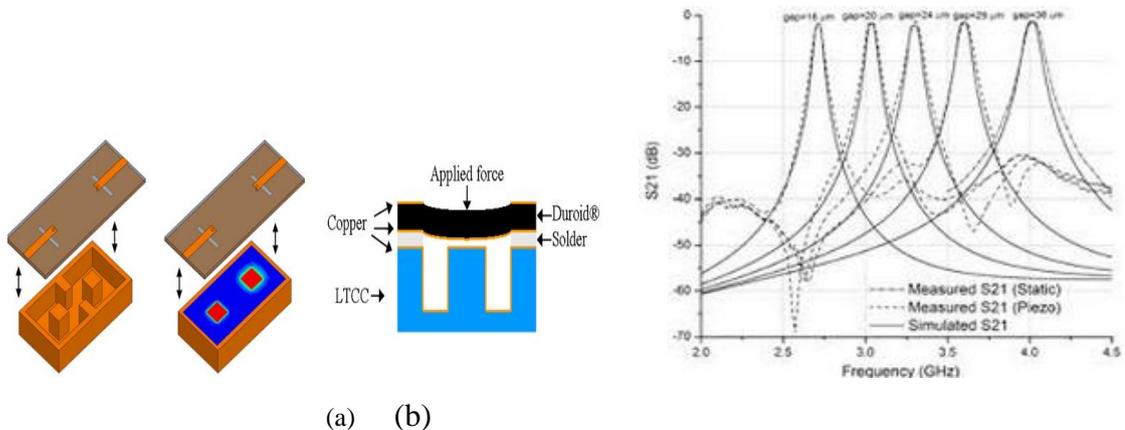


Figure I- 25: (a) Modèle du filtre accordable deux pôles(b) la réponse EM du filtre en simulation et mesure en fonction du gap capacitif

IV.3.2. Les transducteurs photoconducteurs

Le contrôle optique est apparu vers le milieu des années 70. Le principe est basé sur la modification des caractéristiques de propagation du signal. La commande est dans ce cas lumineuse et plus particulièrement réalisée grâce à un laser.

En général, il y a deux types de contrôle optique : direct et indirect.

- Le contrôle optique direct est basé sur l'effet photoconducteur, modifiant directement les caractéristiques microondes et électriques d'un substrat dans la zone d'éclairement. En effet, l'effet photoconducteur repose sur la conversion de photons en paires électron-trou dans un substrat semiconducteur lorsqu'il est éclairé [52]. La génération des paires électron-trou, à un endroit précis du composant par une source optique d'énergie supérieure à la bande interdite du matériau, modifie localement la conductivité et la permittivité du substrat (Figure I- 26).
- Le contrôle optique indirect basé sur l'effet photovoltaïque ou photoconducteur. Un composant intermédiaire est nécessaire pour convertir le signal optique en signal électrique. Le réel élément d'accord, de type varactor à semiconducteur par exemple, utilise ensuite le signal électrique converti. Les pertes d'insertion et plages d'accord du système dépendent principalement du varactor utilisé et non de l'élément intermédiaire.

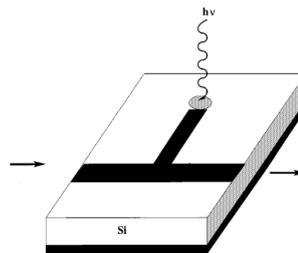


Figure I- 26: Exemple de contrôle optique de la fréquence de résonance d'un filtre coupe-bande en technologie microruban [53]

- Avantages de cette technologie :

La co-réalisation des circuits microondes monolithiques intégrés (MMIC) et optiques intégrés sur un seul et même substrat permet de diminuer les dimensions et de rendre l'ensemble plus compact [54].

- Limitations de cette technologie :

La variation des propriétés du substrat obtenue dépend de la puissance du signal lumineux incident et de la tension continue appliquée [55,56]. Ce type d'accord nécessite l'utilisation de systèmes à base de fibres optiques, ce qui peut être encombrant.

IV.3.3. Les systèmes micro-électro-mécaniques

Les MEMS (MicroElectroMechanical Systems) en français microsystèmes électromécaniques ont été développés depuis 1970 pour réaliser des capteurs de très forte température ou de pression et d'autres appareils de détection. Ils connaissent depuis une

évolution au niveau commercial et militaire. Ils intègrent sur une seule puce, à l'échelle micrométrique, des composants mécaniques et électroniques qui servent à remplir une fonction déterminée.

Les varicap MEMS microondes développés depuis 1990 ont permis de franchir des verrous technologiques [57] et d'atteindre de bonnes performances en termes de fréquence de coupure et de facteur de qualité ($Q > 100$ aux fréquences microondes). Ce pas en avant autorise le développement de nouveaux circuits accordables adaptés aux besoins actuels.

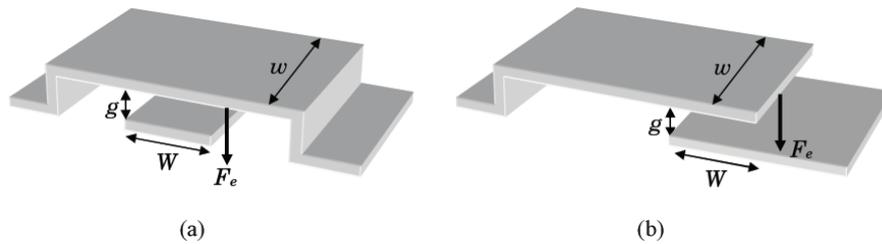


Figure I- 27 : Configurations typiques de varactors MEMS analogiques. (a) poutre à double encrage (pont) et (b) poutre à simple encrage (cantilever).

Nous entendons par varactor analogique, un varactor présentant une capacité pouvant prendre toutes les valeurs comprises entre ses deux valeurs extrêmes C_{\min} et C_{\max} , par opposition avec le varactor discret qui ne présente qu'un nombre fini de valeurs. Lorsqu'une tension continue est appliquée entre la poutre de largeur w et l'électrode de largeur W , une force électrostatique F_e est exercée sur cette poutre comme le montre la Figure I- 27, force proportionnelle à w et W . Cette force F_e va alors contraindre la poutre à se déformer et à se rapprocher de l'électrode fixe, diminuant alors la distance g . La capacité présentée par le varactor, correspondant en première approximation à la capacité plan entre les deux électrodes ($C = \epsilon_0 \frac{Ww}{g}$), va alors augmenter (Figure I- 28).

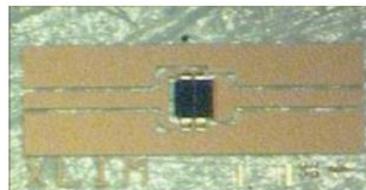


Figure I- 28: Microphotographie de la diode varicap mems fabriquée [58]

IV.3.4. Les matériaux commandables

Ces matériaux sont généralement utilisés sous forme de couches minces déposées sur un substrat mécanique. Ainsi, contrairement à l'influence locale présentée par des varactors

du type MEMS ou semiconducteur, l'effet exercé par ces substrats commandables est distribué sur tout ou partie de la surface du dispositif.

Ces matériaux sont basés sur des matériaux capables de voir modifiée, sous l'application d'un champ électrique ou magnétique, soit leur permittivité soit leur perméabilité. Parmi ces matériaux on trouve : les matériaux ferroélectriques, les magnétoélectriques et les cristaux liquides.

IV.3.5. Les éléments à semi-conducteur

La réalisation de fonctions accordables peut aussi être menée par des éléments agiles contrôlables par une action extérieure (tension, courant, etc.). On trouvera ainsi, des composants variables à semi-conducteurs (diodes PIN, diode varactors, transistors à effet de champ etc.)

IV.3.5.1. Intégration des diodes varicap ou varactor

Le principe de ces varactors consiste à commander la tension de polarisation de ce dispositif en régime de fonctionnement inverse : ainsi, le comportement prédominant de la diode ou du transistor est défini par sa capacité de jonction variable en fonction de la tension continue de polarisation. Avec ce dispositif, on s'intéresse au rapport C_{\max}/C_{\min} ainsi qu'au facteur de qualité pour ne pas avoir des pertes relativement fortes aux hautes fréquences (GHz). Les diodes varactors sont utilisées dans les domaines microondes pour la fabrication d'antennes, de filtres accordables, de déphaseurs

Les varactors sont des composants à semiconducteur formés de jonctions PN commandés en tension. En polarisation inverse, la diode se comporte comme une capacité variable C_s dont la valeur dépend de la tension continue appliquée à ses bornes avec une résistance série variable R_s (Figure I- 29), cette dernière fixant le facteur de qualité du composant. Lorsque la valeur de la tension inverse augmente, la valeur de la capacité diminue. La capacité parallèle C_p est une capacité fixe parasite qui provient de la géométrie de la diode et la self parasite L des bondings internes. La caractéristique principale de la diode varicap est la plage de variation de la capacité qui est de quelques pF à quelques dizaines de pF pour une tension de polarisation inverse de quelques dizaines de volts.

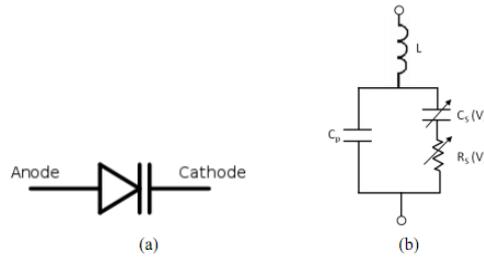


Figure I- 29 : (a) Symbole d'une diode varicap (b) le modèle équivalent en polarisation

La Figure I- 30 présente un exemple d'un résonateur SIW accordable en utilisant une diode varactor [59]. Ce filtre nous permet d'avoir une accordabilité de 15% sur une fréquence qui varie entre 2,6 et 3,1 GHz en appliquant une tension qui varie entre 2V et 22V avec un facteur de qualité au maximum de 150.

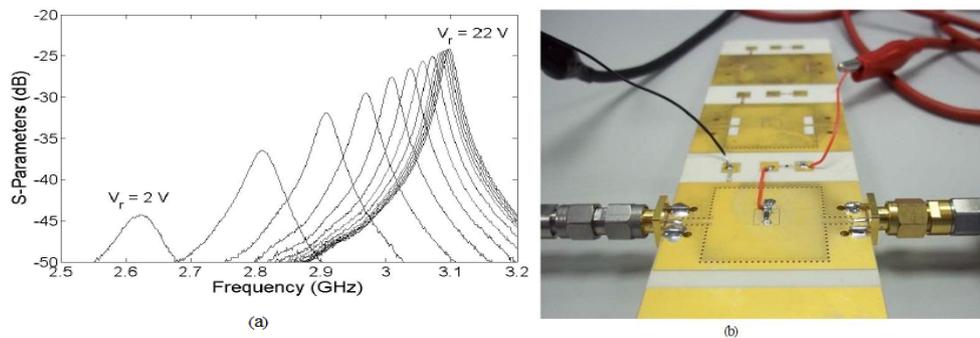


Figure I- 30 : (a) Mesures du résonateur accordable, (b) Résonateur après fabrication[59]

IV.3.5.2. Intégration des diodes PIN

Les diodes PIN sont des composants à semi-conducteurs composés d'une couche intrinsèque non dopée intercalant deux couches fortement dopées P et N (Figure I- 31- (a)).

Elles sont commandées en courant. En polarisation directe, la diode se comporte comme une résistance variable. Le schéma équivalent est une résistance R_s en série avec une self L de faible valeur (Figure I- 31-(b)). La résistance R_s varie en fonction du courant de polarisation.

Cette fonction de la diode est utilisée pour la réalisation des atténuateurs. En effet, lorsque le courant varie continuellement, la résistance série R_s varie (Figure I- 32). En polarisation inverse, la diode se comporte comme une capacité fixe C_f en parallèle avec une résistance R_p le tout en série avec une self L (Figure I- 31-(c)). La résistance R_p correspond à la dissipation de la puissance lorsque la diode est à l'état bloqué. Lorsque la diode est polarisée en régime d'impulsion (signal carré ou dent de scie), elle se comporte comme un

interrupteur qui passe d'un état haut à un état bas. Cette fonction est utilisée pour la réalisation de commutateurs RF ou de modulateurs d'impulsion.

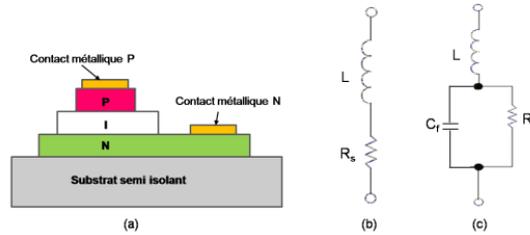


Figure I- 31 : (a) Diode PIN, (b) schéma équivalent en fonction de la polarisation : polarisation en direct, (c) polarisation en inverse.

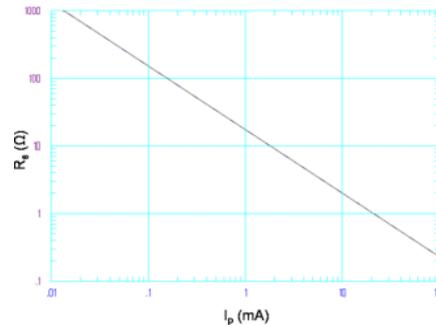


Figure I- 32 : Caractéristique typique de la variation de la résistance R_s en fonction du courant de polarisation (en polarisation directe) d'une diode PIN

Un exemple de l'utilisation de la diode PIN dans le domaine microonde avec un filtre 2 pôles SIW passe bande est visible Figure I- 33. La fréquence varie entre 1,55 GHz à 2,0 GHz ce qui donne 25% d'accordabilité [60].



Figure I- 33 : (a) Filtre SIW accordable avec une diode PIN (b) réponse de la filtre après mesure

Pour conclure cette partie avec les différents types d'éléments accordables, le Tableau I- 3 résume l'accordabilité en fréquence avec le facteur de qualité et sa variation de chaque structure et montre que la technologie piézoélectrique est une bonne candidate pour une large plage d'accord mais qui se fait au détriment d'une dégradation la plus forte du facteur de qualité.

Références	Fréquence (GHz)	% d'accordabilité	Facteur de Qualité	ΔQ
------------	-----------------	-------------------	--------------------	------------

[50] piézoélectrique	5GHz	5,6%	540	2%
[51] piézoélectrique	4GHz	32%	600	48%
[59] Varactor	3GHz	15%	150	-
[60] Diode Pin	3GHz	25%	110	18%

Tableau I- 3 : Résumé des exemples sur l'accordabilité en fréquence

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur la technologie jet d'encre multicouche qui présente la capacité à imprimer des structures métallo-diélectriques. Cette technologie que l'on peut regrouper dans la large catégorie des technologies de prototypages rapides se positionne tout particulièrement la technologie LTCC pour la fabrication de composants hyperfréquences multicouches et multi-matériaux. Les chapitres II et III s'appuieront sur des tests expérimentaux qui permettront d'évaluer en situation les possibilités du jet d'encre sur des composants classiquement réalisés par LTCC.

Nous nous sommes intéressés à la technologie stéréolithographie céramique 3D des pièces 3D complexes avec une précision de fabrication et un état de surface adéquat pour les applications RF visées. Cette technologie nous permettra en particulier de fabriquer des résonateurs pour la réalisation de composants accordables (chapitre IV). Pour rendre ces structures accordables le choix de composants semi-conducteurs (les diodes varactors) sera fait par leur simplicité d'utilisation et de réglage par une tension continue.

VI. Références chapitre I

-
- [1] Ren C. Luo, Fellow, IEEE and Jyh Hwa Tzou, "Advanced Rapid Prototyping Manufacturing System for E-automation", Proceedings of the 2003 IEEE
- [2] J.C. ANDRE, A. LE MEHAUTE & O. DE WITTE, "Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle", Brevet français, 84.11.241, 1984
- [3] M. FURMAN, "Conception et fabrication par stéréolithographie d'un catalyseur monolithique en vue de l'intensification du procédé photocatalytique pour la dépollution de l'air", Thèse de doctorat de l'Institut national polytechnique de Lorraine E.N.S.I.C. - NANCY, Décembre 2006
- [4] C.W. HULL, "Apparatus for production of three dimensional objects by stereolithography", US patent, 4.475.330, 1986
- [5] M. Mougnot, M. Lejeune, R. Boulesteix, B. Fousseret, B. Soulestin, J. F. Baumard, C. Boissiere, C. Sanchez, D. Jalabert, C. Richard, D. Audigier, R. Noguera, C. Dossou-Yovo, "Processing of functional fine scale ceramic structures by ink-jet printing", 10th International Conference of the European Ceramic Society, Berlin : Allemagne 2007
- [6] Brian Derby and Nuno Reis, "Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions", MRS Bulletin, Volume 28, November 2003
- [7] Kitty A. M. Seerden, Nuno Reis, Julian R. G. Evans, Patrick S. Grant, John W. Halloran, and Brian Derby, "Ink-Jet Printing of Wax-Based Alumina Suspensions", J. Am. Ceram 2001
- [8] Shun-Chi Chang, Jie Liu, Jayesh Bharathan, Yang Yang, Jun Onohara and Junji Kid, "Multicolor Organic Light-Emitting Diodes Processed by Hybrid Inkjet Printing", WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69469 Weinheim, 1999
- [9] LE HUE P., "progress and trends in ink-jet printing technology", Journal of Imaging Science and Technology (1998)
- [10] An G. Korvink, Patrick J. Smith, Dong-youn Shin, "Inkjet-Based Micromanufacturing"
- [11] ALLEN RR. , MEYER JD. , KNIGHT WR. , "Thermodynamics and Hydrodynamics of Thermal Ink Jets", Hewlett Packard Journal, 122, 1985
- [12] Wehl W., Wild J., Lemmermeyer B., Kubler M., "A Drop-on-Demand Printhead Suitable for Hot and Relatively Viscous Liquids", International Workshop on Ink-jet Printing of Functional Polymers and Materials, 29-30 June 2005, Eindhoven, The Netherlands
- [13] J.R.G. Evans, M.J. Edirisinghe , P.V. Coveney , J. Eames, "Combinatorial searches of inorganic materials using the ink-jet printer: science, philosophy and technology", Journal of the European Ceramic Society, Volume 21, Issue 13, November 2001
- [14] Greger Thornell, Lena Klintberg, Thomas Laurell, Johan Nilsson and Stefan Johansson, "Desktop microfabrication - initial experiments with a piezoceramic », J. Micromech. Microeng, 1999
- [15] C Ainsley, N Reis, B Derby, "Direct Ink Jet Printing Of Alumina Components", Electroactive Polymers And Rapid Prototyping 2002

- [16]G. Senlis, « Mise Au Point De Suspensions Thermofusibles Compatibles avec Un Procédé De Prototypage Rapide De Type Impression Pour La Réalisation De Structures Ceramiques De Formulation 0,9PBMG0,33NB0,66O3(PMN) 0,1PBTIO3(PT) », Thèse de l'Université de Limoges 2003
- [17]Donald J. Hayes, W. Royall Cox, and Michael E. Grove, “micro-jet printing of polymers and solder for electronics manufacturing”, *journal of electronics manufacturing* 08, 209, 1998
- [18]Zhenan Bao, John A. Rogers and Howard E. Katz, “Printable organic and polymeric semiconducting materials and devices”, *J. Mater. Chem.*, 1999, 1895-1904
- [19]Eliav I. Haskal, Michael B.chel, Paul C. Duineveld, Aad Sempel, and Peter van de Weijer, “Passive-Matrix Polymer LightEmitting Display”, *Mrs bulletin*, November 2002
- [20]A. Atkinson, J. Doorbar, A. Hudd, D.L. Segal, P.J. White, “Continuous ink-jet printing using sol-gel ‘ceramic’ inks”, *J.Sol-Gel Sci. Technol.* 8, 1093–1097, 1997
- [21]DONGJO K. et al, “Ink-jet printing of silver conductive tracks on flexible substrates”, *Mol. Cryst. Liq Cryst*, vol.459, p. 45-55, 2006
- [22]RADULESCU D. et al, “3D Printing of Biological Materials for Drug Delivery and Tissue Engineering Applications”, *the International Conference on Digital Fabrication Technologies*, (2005)
- [23]BONACCURSO E. et al, “Fabrication of microvessels and microlenses from polymers by solvent droplets”, *Applied physics letters*, 86, (2005)
- [24]DANZEBRINK R., AEGERTER MA., Deposition of optical microlens arrays by inkjet processes, *Thin Solid Films*, 392: 223_225, (2001)
- [25]GANS BJ, HOEPPENER S, SCHUBERT US, “Polymer-Relief Microstructures by Inkjet Etching”, *Adv. Mater.*, 18: 910–914, (2006)
- [26]WANG Y., BOKOR J., LEE A., “Maskless Lithography Using Drop-On-Demand Inkjet Printing Method”, *Emerging Lithographic Technologies VIII, Proceedings of SPIE*, 5374 (2004)
- [27]NOGUERA R., LEJEUNE M., CHARTIER T., « 3D fine scale ceramic components formed by ink-jet prototyping process”, *Journal of the European Ceramic Society*, 25, p. 2055-2059, (2005)
- [28] Li Yang and Manos M. Tentzeris, “Design and Characterization of Novel Paper-based Inkjet-Printed RFID and Microwave Structures for Telecommunication and Sensing Applications”, *Microwave Symposium, 2007 IEEE/MTT-S International*, June 2007
- [29]Riccardo Moro, Maurizio Bozzi, Riccardo Moro, Manos Tentzeris, “Novel Inkjet-Printed Substrate Integrated Waveguide (SIW) Structures on Low-Cost Materials for Wearable Applications”, *Proceedings of the 42nd European Microwave Conference*, November 2012
- [30]J. Papapolymerou, “Recent Advances in Multilayer Organic Microwave and mm-wave Front Ends”, *Workshop on Advances in Multilayer Microwave and mm-Wave Technologies, European Microwave Conference, Nuremberg*, 2013
- [31]C.Q. SCRANTOM & J.C. LAWSON, “LTCC technology: where we are and where we’re going-II”, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, p.193 -200, 1999
- [32]W. BAKALSKI, N. ILKOV, O. DERNOVSEK, R. MATZ, W. SIMBURGER, P. WEGER, A.L. & SCHOLTZ, “5-6.5 GHz LTCC power amplifier module with 0.3 W at 2.4 V in Si-bipolar”, *IEEE Electronics letters*, volume 39, n° 4, p. 375-376, Mars 2003

- [33]XIAOYU MI, O. TOYODA &S. UEDA, “MEMS tunable bandpass filters on high-k LTCC”,23rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), p. 787-790, Janvier 2010, Wanachi, Hong Kong
- [34]Ali Khalil
« Technologies LTCC et stéréolithographie céramique 3D appliquées à la conception de dispositifs millimétriques et sub-millimétriques », Université De Limoges 2010
- [35]Tze-Min Shen and al., “Development of Millimeter-Wave Multifunction LTCC Components for Systemin Packages Applications”, Proceedings of the 43st European Microwave Conference, octobre 2013, NUREMBERG, GERMANY
- [36]S. Butterworth, « On the Theory of Filter Amplifiers », Wireless Engineer , vol. 7 (1930), pp. 536-541
- [37]S.B.Cohn, “Parallel-Coupled Transmission Line Resonator Filters,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.6, No.2, pp.223-231, April 1958
- [38]E.G.Cristal and S.Frankel, “Hairpin-Line and Hybrid Hairpin-Line Half-Wave Parallel-Coupled-Line Filters,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.20, No.11, pp.719-728, November 1972.
- [39]G.L.Matthaei, N.O.Fenzi, R.J.Forse and S.M.Rohlfing, “Hairpin-Comb Filters for HTS and Other Narrow-Band Applications,” IEEE Transactions on Microwave
- [40]Yinqiao Li, Le Hu2, Jiechen Chen, Yuanchun Feil, “A Ku-Band Hairpin Filter Based on LTCC Technology”, IEEE 2014
- [41]Zulkifli Ambak and al., “Design of Interdigital B and Pas s filter for WLAN applications using L TCC technology”, Proceedings of IO10 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE 2010)
- [42]T. LENADAN, « Contribution à la Conception et à la Réalisation de Modules Hyperfréquences Multi-Fonctions. Apports d'une Solution d'Intégration par Combinaison de Filières Technologiques Hybrides 3D » ,Université de Brest, n° d'ordre 723, Février 2000
- [43]F. Shigeki, “Waveguide line,” Japanes patent: JP 06 053711, 1994
- [44]A. Piloto, K. Leahy, B. Flanick and K. A. Zaki, “Waveguide filters having a layered dielectric structures,” U.S. Patent: 5 382 931, Jan. 1995.
- [45]M. Ando, J. Hirokawa, T. Yamamot, A. Akiyama, N. Kimura, Y. Kimura and N. Goto, “Novel single-layer waveguides for high-efficiency millimeter-wave arrays,” IEEE millimeter waves conference proceedings, pp. 177-180, 1997.
- [46]D. Dancila, X. Rottenberg, H. A. C. Tilmans, W. De Raedt and I. Huynen,“57-64 GHz Seven-Pole Bandpass Filter Substrate Integrated Waveguide (SIW) in LTCC”, 2011 IEEE MTT-S
- [47]R. Zhang and R. R. Mansour, “Dielectric resonator filters fabricated from high-K ceramic substrates,” in IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., Jun. 2006, pp. 234–237
- [48]J. Uher and W. J. R. Hoefer, “Tunable microwave and millimeter-wave band-pass filters,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 39, no. 4, pp. 643–653, April 1991
- [49]I. C. Hunter, L. Billonet, B. Jarry, and P. Guillon, “Microwave filters–applications and technology,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 50, no. 3, pp. 794–805, March 2002
- [50]F. Huang and R. R. Mansour, «Tunable Compact Dielectric Resonator Filters », University of Waterloo, Proceedings of the 39th European Microwave Conference

- [51] H.Joshi, H.Sigmarsson, D. Peroulis, and W.J. Chappell, "Highly Loaded Evanescent Cavities for Widely Tunable High-Q Filters", IEEE 2007
- [52] N. MARTIN, « Contribution à la Réalisation de Circuits Hyperfréquences Reconfigurables à partir de Cristaux Liquides : des Matériaux aux Dispositifs », Mémoire de Doctorat en Electronique, Université de Bretagne Occidentale, Décembre 2004.
- [53] J.-D. Arnauld, A. Vilcot, and G. Meunier, "Toward a simulation of an optically controlled microwave microstrip line at 10 GHz," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, no. 2, pp. 681–684, March 2002
- [54] C. Tripon-Canseliet, S. Faci, F. Deshours, C. Algani, G. Alquié, S. Formont, J. Chazelas, "Electromagnetic modeling and characterization of an optically-controlled microwave phase shifter in GaAs integrated technology", Gallium Arsenide and Other Semiconductor Application Symposium, 2005. EGAAS 2005. European
- [55] E. PISTONO
« Conception et réalisation de filtres microondes planaires accordables par varactors, à base de structures périodiques », Mémoire de Doctorat en Optique et Radiofréquence, Institut National Polytechnique de Grenoble, Juillet 2006
- [56] J. HAIDAR, M. BOUTHINON, A. VILCOT, « A new optoelectronic technique for microwave passive structures tuning », IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, pp. 1437 – 1440, 1996
- [57] G. M. Rebeiz, "RF MEMS Theory, design, and technology". Wiley and Sons, 2003
- [58] D. Mardivirin, A. Pothier, J.C. Orlianges, A. Crunteanu, P. Blondy, "Charging Acceleration in Dielectric Less RF MEMS Switched Varactors under CW Microwave Power", 2009 IEEE
- [59] S. Sirci, J.D. Martinez, M. Taroncher, V.E. Boria, "Varactor-Loaded Continuously Tunable SIW Resonator for Reconfigurable Filter Design", Proceedings of the 41st European Microwave Conference, octobre 2011, Manchester UK
- [60] Marcelino Armendariz and al., "Tunable SIW Bandpass Filters with PIN Diodes", Proceedings of the 40th European Microwave Conference, September 2010, Paris, France

Chapitre II: La technologie jet d'encre pour l'impression des composants multi-matériaux

I. Introduction

Dans le chapitre I, nous avons présenté différentes technologies multicouches et multi-matériaux. Parmi ces technologies, nous nous intéressons plus particulièrement dans ce chapitre à présenter la technologie jet d'encre.

Ce travail est effectué dans le cadre d'un projet financé par le CNES (Centre National d'Études Spatiales - R&T), en collaboration avec le laboratoire UMR CNRS SPCTS (Science des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface), l'entreprise CERADROP et le laboratoire XLIM. Cette technologie qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet [1] sur la base de résultats obtenus au cours de la thèse de R. Noguera [2] (Directeur de CERADROP aujourd'hui), permet la réalisation en films minces de structures 3D multicouches et multimatériaux. Le projet a pour objectif la réalisation de composants hyperfréquences imprimés, plus particulièrement des filtres en utilisant des encres métalliques et diélectriques dont les caractéristiques (respectivement conductivité et permittivité diélectrique, tangente de pertes diélectriques) sont adaptées à l'objectif cité. Nous nous sommes de plus concentrés sur des encres, métalliques mais aussi diélectriques dont la cuisson est possible. Pour cela, deux orientations étaient envisageables au départ de cette action :

-Utiliser des encres diélectriques à base d'Alumine céramique présentant d'excellentes propriétés aux microondes (forte permittivité diélectrique relative, entre 9 et 10, intéressante pour la réduction de la taille des composants, faibles pertes diélectriques). Néanmoins, cette céramique doit être frittée à haute température (~1700°C) et les seules encres métalliques à base de rhodium sont compatibles avec cette température (point de fusion à 1964°C), et elles ne présentent pas une très bonne conductivité électrique ($\sigma=2,1 \text{ S}/\mu\text{m}$) : les pertes des composants réalisés sont alors importantes.

-Utiliser des encres métalliques à base de nano particules d'argent dont les conductivités sont bien meilleures ($\sigma= 63 \text{ S}/\mu\text{m}$). Néanmoins, ces encres ne peuvent pas être cuites à plus de 800-900°C, ce qui implique le développement d'encres diélectriques dont la température de frittage est dans cette gamme de température.

Le choix s'est donc porté sur la deuxième option, pour potentiellement limiter les pertes des composants réalisés ; il faut alors s'orienter vers l'utilisation de céramiques à basse température de frittage, comme celles utilisées dans la technologie LTCC (voir chapitre I).

Dans cette optique, le SPCTS a eu pour mission de développer, en se basant sur la recherche des matériaux LTCC les plus adaptés, une encre diélectrique compatible avec un dépôt par jet d'encre. L'étude de compatibilité avec ce procédé d'impression par jet d'encre s'est faite en lien avec la PME CERADROP, qui a réalisé l'ensemble des composants du projet. XLIM est pour sa part intervenu dans la caractérisation microondes des encres, la conception et le test des composants réalisés.

Dans ce chapitre, nous présentons le travail effectué successivement en 2D par l'impression des composants planaires à base de couches d'argent, pour déterminer les tolérances de fabrication typiques, puis en 3D par l'impression de différents composants multicouches.

Cette technologie d'impression a été imaginée pour la première fois par Lord RAYLEIGH en 1878 [3]. Le principe de l'impression par jet continu « CIJ » (Continuous Ink-Jet) a été décrit par Richard G. Sweet dès 1964 [4, 5] ; il a montré que l'encre pouvait former des gouttes uniformes et répétables en appliquant une onde de pression à une buse. Il a été ensuite démontré que les gouttes, une fois chargées, pouvaient être déviées par un champ électrique : il était alors possible de sélectionner celles qui seraient déposées sur le substrat.

Dans les années 1970, le professeur Suédois Hertz a développé la technologie «Greyscale », offrant la possibilité d'imprimer en niveaux de gris, en faisant varier la taille des gouttes à chaque éjection [6].

Le procédé « goutte à la demande » (Drop-On-Demand : DOD) pour lequel la goutte n'est générée que si elle est désirée sur le support, ce qui évite le système complexe de récupération des gouttes déviées, a été développé en 1977 par Siemens (PT-80), puis en 1978 par Silonics.

En 1990, EPSON parvient à développer sa propre technique de tête d'impression piézoélectrique. Cette société est aujourd'hui un des acteurs principaux du marché des imprimantes de bureau.

Pour ce qui concerne les réalisations de composants microondes, le professeur Manos Tentzeris a en particulier présenté différentes structures imprimées par des encres à base de nanoparticules d'argent, de conductivité $25 \text{ S}/\mu\text{m}$. Ces impressions sont effectuées d'une part sur des papiers, mais il a également montré la possibilité d'imprimer sur composants 3D [7, 8, 9]. Plusieurs laboratoires travaillent maintenant sur ce procédé, et de nombreux articles ont été publiés récemment.

Ces résultats sont d'intérêt pour des applications bas coûts, et donc la réalisation de composants en grandes séries. Néanmoins, il reste d'intérêt d'utiliser cette technique pour la réalisation de composants aux performances électriques plus élevées (faibles pertes), à un coût restant limité par rapport aux techniques concurrentes (LTCC), sur la base de l'utilisation de matériaux céramiques, ce qui fait l'objet du projet financé par le CNES.

II. Les équipements de la technologie Jet d'encre

L'imprimante développée par CERADROP, utilisée pour cette étude, est présentée ci-dessous sur la Figure II- 1 :

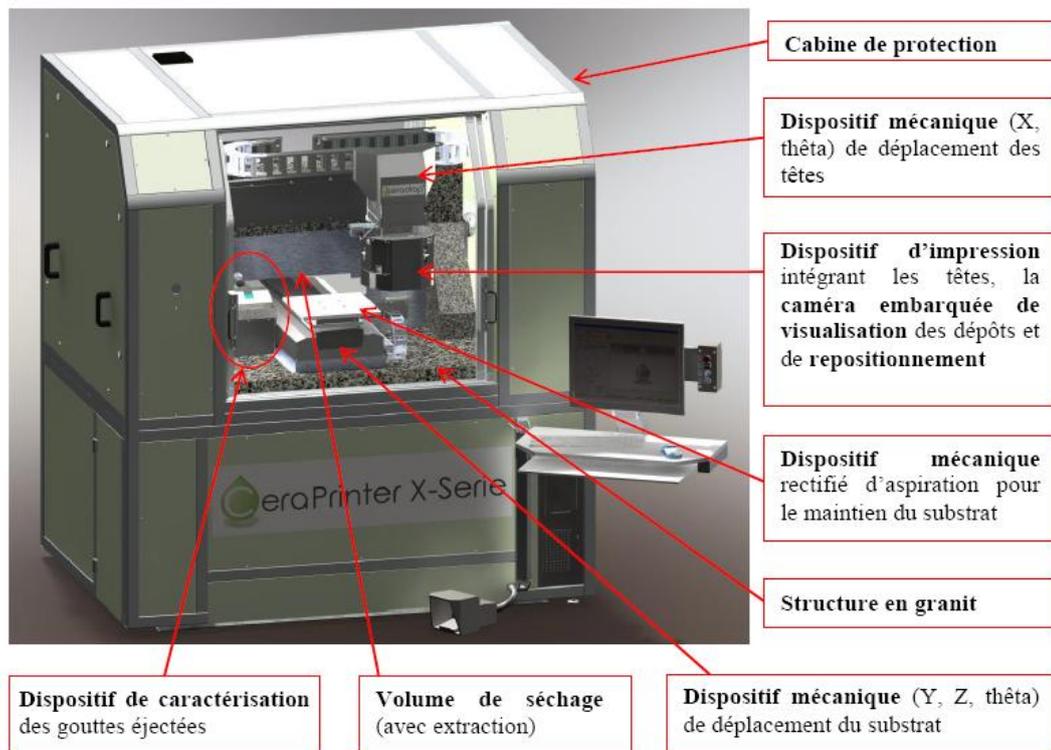


Figure II- 1 : machine d'impression Jet d'encre fabriquée par CERADROP

La machine est constituée de trois parties essentielles:

- un dispositif mécanique de déplacement des têtes,
- un dispositif d'impression,
- un pilotage informatique spécifique de l'ensemble.

II.1. Dispositif mécanique de déplacement des têtes

Trois platines de micro-positionnement assurent le déplacement du système d'éjection suivant les axes X, Y et Z au-dessus d'un substrat fixe. Leurs performances définissent la précision, la résolution, la répétabilité, la vitesse ou encore le volume de fabrication.

Pour l'équipement dont nous disposons, la précision absolue statique de placement des têtes sur la surface de travail complète est de $2,4\mu\text{m}$, la même précision en dynamique est de $2,7\mu\text{m}$ avec une répétabilité de $0,8\mu\text{m}$. La surface de fabrication maximale est de 300 mm^2 . La vitesse maximale de déplacement des buses est égale à 500 mm/s .

II.2. Dispositif d'impression

II.2.1. Caractéristiques de la tête d'impression

Le dispositif d'impression désigne les structures de stockage et d'éjection de l'encre, ainsi que les éléments permettant d'adapter les conditions opératoires afin de permettre un fonctionnement optimal (régulation de la pression, application du pulse sur les buses d'éjection piézoélectrique, etc...). CERADROP [10] utilise une tête d'impression commerciale constituée de buses piézoélectriques dont les spécifications sont répertoriées dans le tableau ci-dessous (Tableau II- 1)

	Tête d'impression
nombre de buses	256
Diamètre des buses (μm)	43
Espacement entre buses (μm)	254
Volume des gouttes (pL)	[18-20]

Tableau II- 1: Les caractéristiques de la tête d'impression

L'ensemble de ce dispositif est piloté par informatique afin de réaliser des différentes actions (nettoyage des buses, éjection de la solution) et de contrôler certains paramètres du système (pression au sein du réservoir pendant le fonctionnement ou pression dans la tête d'impression pendant la purge).

L'éjection de l'encre est basée sur deux éléments importants : la bonne adaptation de la formulation d'encre au système d'impression et le type de pulsation électrique appliqué à la buse. Ces pulsations permettent de régler les caractéristiques des gouttes éjectées (vitesse d'éjection, quantité d'encre éjectée).

La forme d'onde de ces pulsations est caractérisée par trois temps (T1, T2, T3) et une amplitude comme le montre la Figure II- 2 ci-dessous :

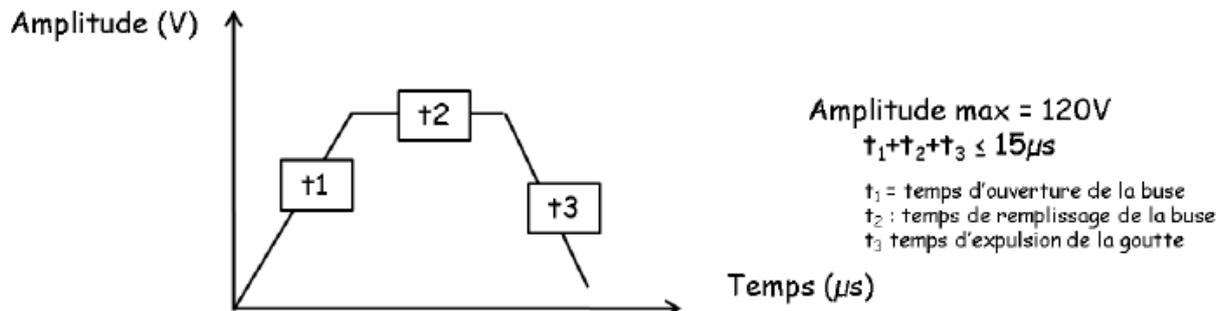


Figure II- 2 : la variation d'amplitude de l'impulsion au niveau des buses en fonction du temps

Il est indispensable d'ajuster ces quatre paramètres afin d'obtenir l'éjection stable dans le temps de gouttes individuelles, de taille et vitesse appropriées. Un dernier paramètre a également un effet sur l'éjection : la fréquence de dépôt des gouttes.

Tous ces paramètres sont ainsi à adapter conjointement aux encres pour maîtriser cette technique de dépôt.

II.3. Un pilotage informatique spécifique de l'ensemble

Le pilotage informatique permet d'assurer la synchronisation entre le positionnement des buses et l'éjection de l'encre lors de la fabrication.

L'équipement d'impression utilisé comporte en particulier un logiciel de tranchage dont le fonctionnement peut être important à connaître pour le concepteur de composants. Ce logiciel permet, à partir du fichier CAO 3D de l'objet à imprimer, de définir les fichiers de fabrication couche par couche et trame par trame ; il est laissée la possibilité à l'opérateur de définir le type de remplissage, c'est-à-dire la disposition des gouttes les unes par rapport aux autres, sur une surface donnée. L'opérateur dispose d'un simulateur qui permet de simuler l'impression et d'identifier a priori les problèmes potentiels à corriger.

III. Caractéristiques des encres déposées

Une suspension destinée au jet d'encre est typiquement constituée des éléments suivants :

- la poudre
- le solvant
- un agent dispersant
- le liant
- des ajouts chimiques éventuels (tensioactif, anti-moussant)

L'éjection de poudres céramiques ou métalliques par un procédé jet d'encre conduit à un empilement de grains qui donne directement la forme de l'objet désiré ; ainsi dans le cas de fabrications de pièces tridimensionnelles, il est nécessaire d'introduire un liant organique afin de donner une certaine résistance mécanique à l'objet avant le traitement thermique conduisant à sa densification.

Le solvant utilisé dans ce type de suspension est volatil, de nature organique (éthanol, propanol, octane) et/ou à base d'eau, si bien qu'après impact sur le substrat, il s'évapore et laisse un dépôt constitué uniquement de la poudre et des différents additifs organiques qui permet d'assurer la cohésion de l'encre et contrôler sa viscosité (dispersant, liant,...).

Pour illustration des ordres de grandeurs de paramètres caractéristiques des encres, nous décrivons dans ce paragraphe l'encre métallique d'argent utilisée dans le cadre de cette thèse, qui a été développée par CERADROP. Il s'agit d'une encre nanométrique Ag dont les caractéristiques physico chimiques sont répertoriées dans le

Tableau II- 2 ci-dessous.

Propriétés Physico-chimiques	Encre	Spécifications des têtes d'impression
pH	6,7	2 à 10
Conductivité à 25°C (mS/cm)	1,71	-
Viscosité à 20°C & 1000s-1 (mPa.s)	15,27	10 à 20
Tension de surface (mN/m)	43,1	30-33
Densité (g/cm ³)	1,527	-
Rapport d'éjection	2,71	-
Taux de sédimentation /10h (%m)	5,02%	< 10%

Tableau II- 2: propriétés physico-chimiques d'encre argent

On peut ainsi voir que les encres doivent présenter un pH, une viscosité et une tension de surface dans des gammes de valeurs bien précises. La viscosité et la tension de surface définissent en particulier si les encres sont assez fluides pour être correctement éjectées. A noter que le taux de sédimentation quantifie la quantité de particules dans l'encre (par unité de volume) qui sédimenterait au fond du réservoir sur une unité de temps. Il se doit d'être faible pendant plusieurs heures, ce qui caractérise en pratique la durée d'utilisation de l'encre en cours de procédé.

IV. Caractérisation de l'éjection de l'encre métallique avec la tête d'impression

L'éjection des gouttes est observée expérimentalement de façon stroboscopique via l'acquisition d'image grâce à une LED et une caméra CCD. La Figure II- 3 montre à titre d'illustration les différentes images captées par la caméra CCD afin de pouvoir visuellement contrôler quelles buses ont éjecté correctement leur goutte.

C'est l'analyse automatisé de ces images qui permet au travers d'un rapport d'analyse (Figure II- 4) d'identifier les buses fonctionnelles pour l'impression à suivre.

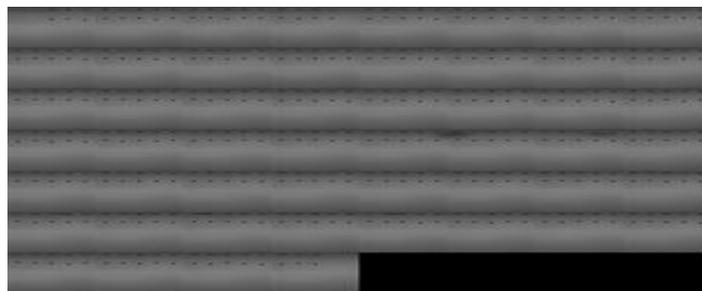


Figure II- 3: Détection des buses actives



Figure II- 4 : Mosaïque de l'éjection de l'encre Ag à 300µs avec la tête d'impression

Plus de 90% des buses sont typiquement actives sur une tête. Après ce test d'éjection et la détection des buses actives, le rapport d'analyse permet aussi d'obtenir les différentes caractéristiques des gouttes. Un exemple est donné Tableau II- 3.

Volume moyen (pL)	18-40
Vitesse moyenne (m/s)	3-5
Diamètre (μm)	35-40

Tableau II- 3: rapport d'analyse

La gamme de volume atteinte est directement corrélée à la variation du pulse électrique de sollicitation. Plus le volume de la goutte sera faible, meilleure sera la définition du motif.

Nous cherchons ensuite à estimer les caractéristiques d'une goutte.

La définition des motifs à imprimer va donc dépendre de la taille d'une goutte d'encre sur le support. Cette taille est fonction de plusieurs paramètres qui peuvent interagir entre eux :

- diamètre de la buse
- volume de la goutte
- pulse de sollicitation de la buse piézoélectrique
- fréquence d'éjection

Il est possible d'obtenir des gouttes de 20pL à 25pL avec la tête d'impression disponible. En dessous de ce volume, la stabilité et la reproductibilité de l'éjection ne sont plus garanties.

Les Figure II- 5 ci-dessous montrent l'effet du volume de la goutte et des différents paramètres d'éjection sur le diamètre moyen du dépôt. Pour les mêmes paramètres d'impression (vitesse, diamètre, fréquence,...), le diamètre de la goutte après impression est directement logiquement lié à son seul volume en sortie de buse. Cette valeur a un effet très important sur la tolérance de fabrication de cette technologie.

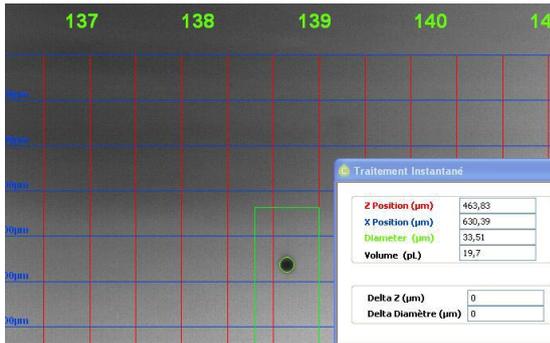


Figure II- 5.a1 : Volume de goutte en vol estimé à

20p

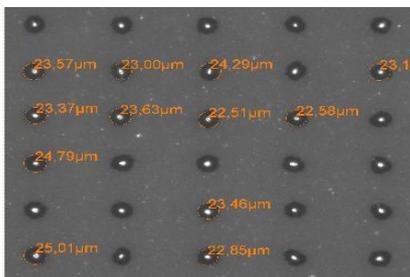


Figure II- 5.a2 : Diamètre moyen du dépôt de

46µm



Figure II- 5.b1 : Volume de goutte estimé en vol à

25pL

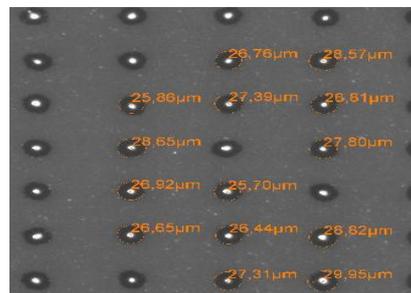


Figure II- 5.b2 : Diamètre moyen du dépôt de

52µm

Cette étape préliminaire est extrêmement importante car la taille moyenne de la goutte ensuite déposée sera l'information de base qui servira ensuite au logiciel gérant l'impression. Ce dernier, sur la base de cette information, permettra de configurer le placement des gouttes, leur pourcentage de recouvrement afin d'imprimer au mieux le motif souhaité.

V. Essai préliminaire: résonateur diélectrique excité par des lignes microruban imprimées par la technologie jet d'encre

Ce résonateur microonde couplé à des lignes microruban est le premier dispositif testé à XLIM intégrant une étape réalisée par la technologie jet d'encre. Le but de ce test était de :

- valider l'impression sur un objet non 2D : en effet les lignes microruban sont imprimées sur une zone de la pièce localisée à 0,455 mm en dessous du point le plus haut de

la pièce céramique, cette configuration rendant l'utilisation de techniques de lithographie délicate.

- tester la conductivité des lignes ainsi déposées aux hautes fréquences (20 GHz)
- coupler les technologies jet d'encre et stéréolithographie dans la réalisation d'un même dispositif.

Ce premier test était probablement trop ambitieux par le nombre de paramètres à valider sur la base d'une seule réalisation : il a cependant été effectué pour identifier les points durs liés à ces technologies et à leur couplage, plutôt que dans l'objectif de réaliser un dispositif fonctionnel. L'encre utilisée pour ce test est chargée de nano particules d'argent de diamètre inférieur à 10nm, encre présentée précédemment dans le paragraphe IV.

V.1. Présentation du résonateur

Comme le montre la Figure II- 6, le dispositif est constitué d'un bloc parallélépipédique céramique central, solidaire de deux barreaux diélectriques latéraux sur lesquels sont déposés les conducteurs métalliques. L'ensemble est blindé par un capot métallique, ouvert au niveau des sorties des lignes microruban pour permettre la mesure.

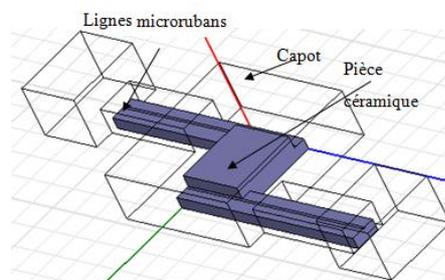


Figure II- 6 : vue 3D (CAO) du dispositif

V.1.1. Partie résonateur

La partie céramique de cette pièce est fabriquée par la technique de Stéréolithographie. La partie centrale faisant office de résonateur diélectrique concentre le champ électromagnétique à la résonance. Les dimensions de ce résonateur ont été fixées afin d'obtenir une résonance de l'ordre de 30 GHz.

V.1.2. Partie lignes microruban

Deux lignes microruban sont positionnées de part et d'autre du résonateur sur deux extensions en céramique afin d'exciter le mode de résonance TE_{101} du résonateur. Ce sont ces deux lignes qui seront donc imprimées par jet d'encre. La dimension des conducteurs est optimisée pour obtenir une impédance caractéristique égale à 50 ohms.

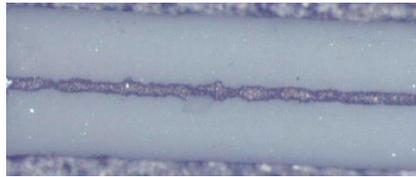


Figure II- 7 : lignes microruban imprimées par jet d'encre

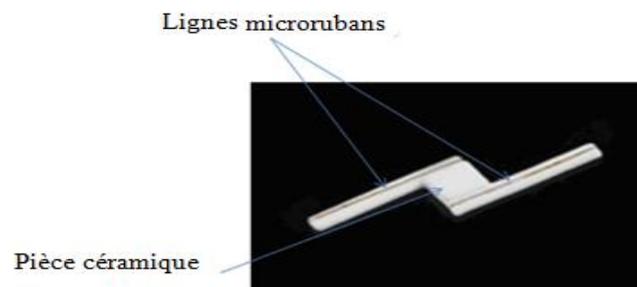


Figure II- 8 : photographie du résonateur en Alumine et des lignes microruban d'excitation

V.1.3. Capot métallique

Pour concentrer le champ dans le résonateur et ainsi éviter toutes pertes par radiations, nous avons besoin d'un capot qui joue le rôle d'une cavité. Ce capot a été réalisé en laiton comme le montre la Figure II- 9. Il est constitué de deux parties qui viendront enserrer la pièce céramique. A noter que le capot inférieur fait aussi office de plan de masse pour les lignes microruban. Les guides formés aux accès du capot enferment les barreaux céramiques supportant les lignes sur une longueur de 4 mm, puis ces barreaux débouchent pour permettre la mesure. Ces guides sont évanescents pour tous les modes supérieurs au quasi-TEM des lignes.

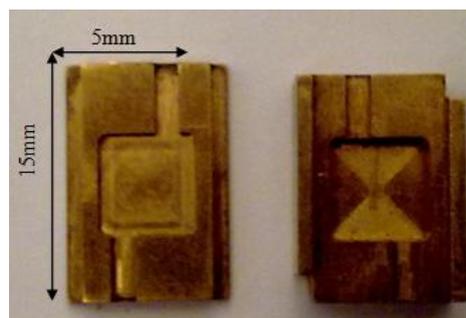


Figure II- 9: capot métallique en laiton

V.2. Mesure des dimensions

Après fabrication par SLA puis impressions par jet d'encre des lignes microruban (voir Figure II- 8), les dimensions de la structure sont mesurées et reportées sur la Figure II- 10 et sur le Tableau II- 4:

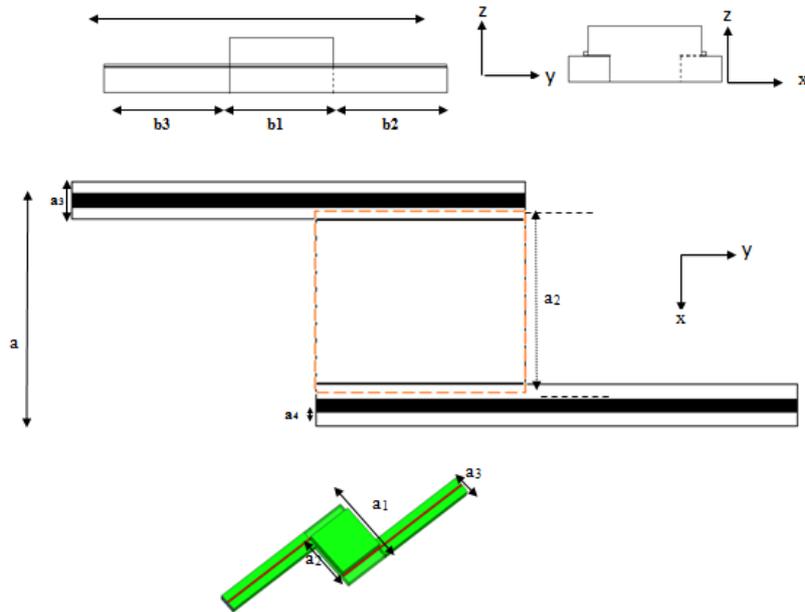


Figure II- 10 : principales dimensions de la structure

dimensions (mm)	a_1	b_1	a_2	a_3	b_2	a_4	b_3	b_4
Théoriques	3,75	2,5	2,15	1	4	0,5	4	10,5
Mesurées	3,744	2,58	2,644	1	5,66	0,1	5,88	14,12

Tableau II- 4 : dimensions de la structure mesurées et théoriques

L'épaisseur des métallisations est évaluée à 10 micromètres.

On relève une différence de dimensions entre les valeurs théoriques et mesurées. Ce point est à relativiser par le fait que ce premier test a été fait sans calibrage particulier, ce qui ne sera pas le cas des essais suivants.

Par la suite, des rétro-simulations seront effectuées en tenant compte des dimensions expérimentales.

V.3. Mesures et rétro simulation (HFSS)

La présente une vue du champ magnétique à la fréquence de résonance du mode de travail, vue qui permet d'identifier le mode TE_{110} .

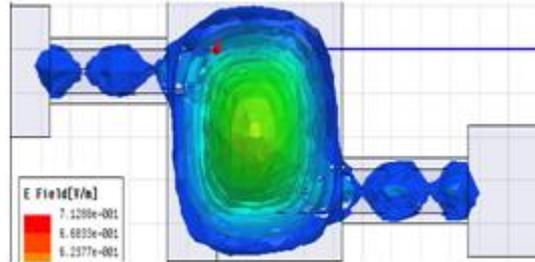


Figure II- 11: tracé du champ électrique du mode TE_{101} à sa résonance

Le matériau Alumine utilisé est caractérisé : on obtient une permittivité relative de 9,1 et une tangente diélectrique de pertes de 10^{-4} à 27,6 GHz.

Une rétro-simulation est effectuée, en considérant les dimensions géométriques mesurées, pour extraire des valeurs de conductivité et de tangente de pertes des matériaux utilisés. (Figure II- 12).

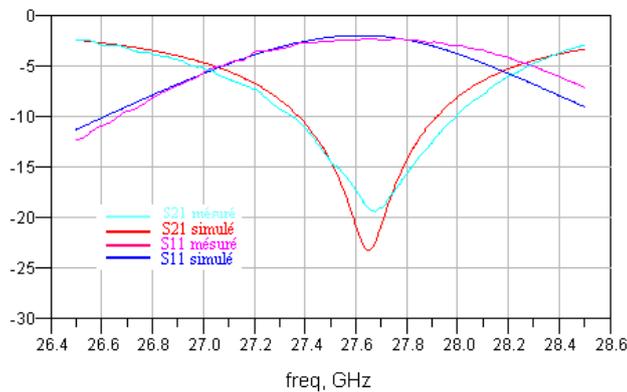


Figure II- 12 : réponse en fréquence du résonateur mesurée et simulée.

On peut constater sur la Figure II- 12 que les réponses du résonateur par simulation (HFSS) et mesurées sont similaires, en considérant une **conductivité simulée de 2.10^7 S/m**. Cette valeur de conductivité est de l'ordre de celles que l'on peut trouver dans la littérature [7-9] pour ces technologies jet d'encre. En conclusion, ce premier essai d'impression sur pièce d'Alumine fabriquée par SLA a validé la possibilité d'imprimer des motifs métalliques sur ce type de support, et a permis d'évaluer la conductivité des couches métalliques déposées.

Après ce premier essai, une évaluation plus poussée de cette technologie a été menée sur la précision de fabrication et sur la confirmation de la valeur de la conductivité de cette encre à base d'argent.

VI. Impression des motifs 2D

L'objectif de l'impression de ces différents motifs sera de quantifier :

- la conductivité de l'encre métallique sur une large gamme de fréquence
- la précision de fabrication via la vérification des dimensions de motifs imprimés par rapport aux dimensions théoriques.

Ainsi différents motifs seront imprimés: différentes largeurs de lignes métalliques, différents gaps entre deux lignes métalliques, différents formes (cercles, octogone, différents angles, ...).

La Figure II- 13 présente les éléments sélectionnés qui sont répartis en 3 zones :

- Zone 1 : large zone métallique en vue d'un test d'accrochage de la métallisation sur le substrat Alumine sélectionné.
- Zone 2 : lignes coplanaires
- Zone 3 : motifs de différentes géométries. Ces différents motifs ont été dessinés à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique Momentum (Agilent). Les objets sont exportés dans un format CAO lisible par les logiciels de CERADROP (format .dxf utilisé).

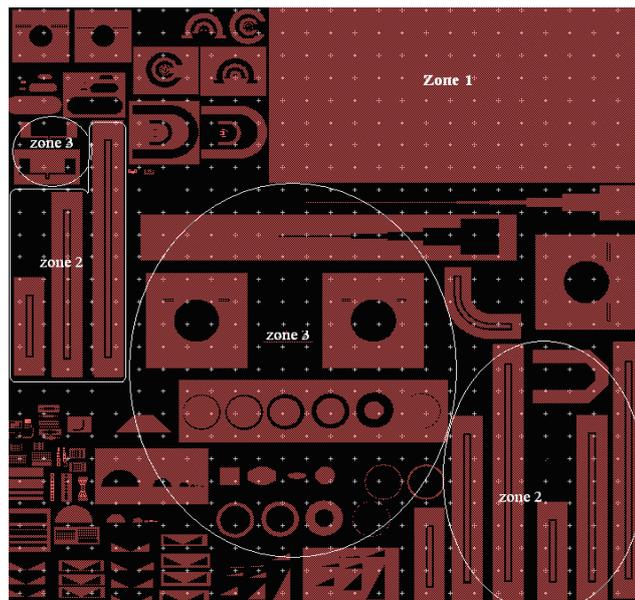


Figure II- 13 : Les motifs à tester.

Chaque motif joue un rôle pour évaluer la qualité de la fabrication :

- Les lignes coplanaires permettent de trouver la conductivité de l'encre déposée.
- Les cercles et leur version négative présentent des formes volontairement délicates qui nous aident à tester le diamètre minimal atteignable avec cette technologie.
- Les autres motifs permettent de tester la largeur minimale, la taille de gap minimale et la capacité à fabriquer différentes formes typiquement utilisées en microélectronique.

Dans notre cas, plusieurs paramètres ont un impact sur la fabrication :

- La température de cuisson une fois l'encre déposée.
- La rugosité des substrats.
- Le nombre de couches.
- Les sens d'impression.
- La vitesse d'impression.

VI.1. Les paramètres d'impression

Une fois le fichier CAO importé, pour créer la hiérarchie d'impression, l'opérateur définit chaque motif ou groupe de motifs comme étant un « objet ». Par la suite, il affecte à chaque objet un jeu de paramètres défini par des « ensembles ». Les couples (objets, ensembles) sont alors affectés à un ou plusieurs « composants ».

Dans l'exemple de la Figure II- 14, six composants C₁ à C₆ ont été créés comptant chacun un ou plusieurs objets affectés à une des trois grandes familles d'ensembles E1, E2, E3, chacune reliée à un code couleur. Cette hiérarchie est interchangeable, que ce soit l'ordre des objets au sein d'un composant ou alors l'ordre des composants, et elle définit le plan d'exécution de l'impression. Les illustrations ci-dessous illustrent la hiérarchie de l'impression.

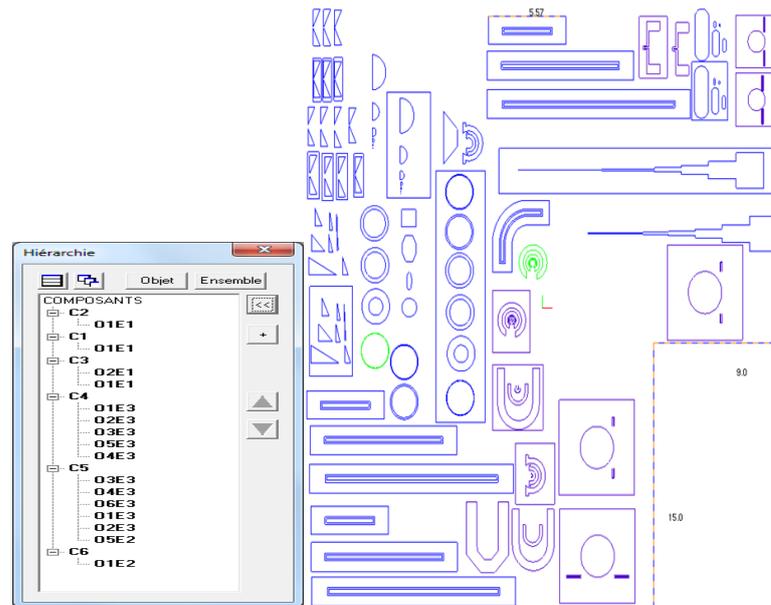


Figure II- 14: hiérarchie de l'impression

Les paramètres d'entrée pour tous les motifs sont principalement : le diamètre de la goutte sur le substrat, et le choix de la maille suivant laquelle le remplissage des formes se fera.

Avec ces paramètres d'entrée, les résultats optimaux, en particulier les distances entre goutte et la vitesse d'impression sont calculés par un logiciel. De plus le logiciel CAO permet de simuler le remplissage de chaque forme (Figure II- 15). Si le remplissage n'est pas optimal alors l'opérateur peut encore modifier les paramètres d'entrée jusqu'à obtenir manuellement les paramètres optimaux conduisant au remplissage optimal.

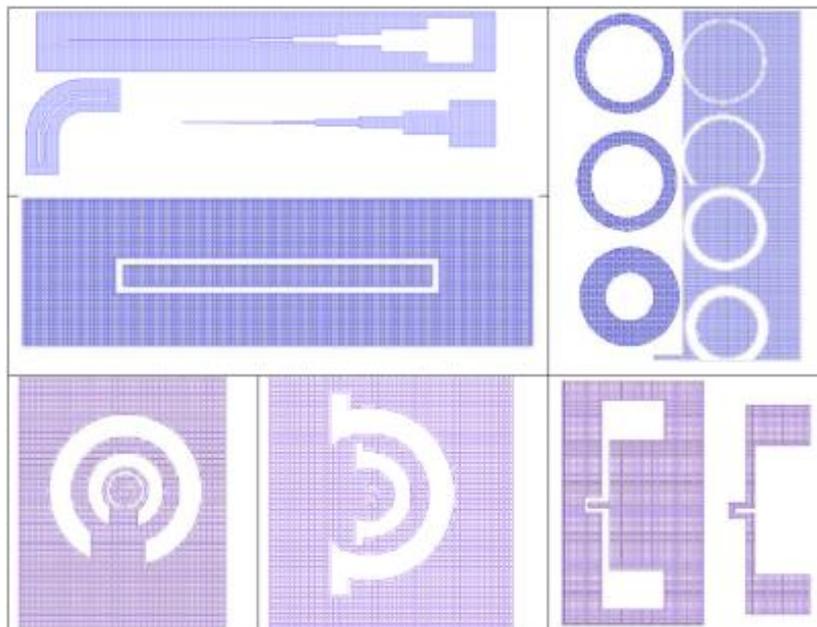


Figure II- 15 : Exemple de simulation du remplissage de certains motifs

Lorsque la phase de simulation du remplissage convient avec les paramètres choisis, les fichiers de fabrication sont ensuite générés toujours via le logiciel CAO puis transférés vers la machine. Par la suite, le substrat est nettoyé avec un rouleau adhésif pour éliminer toutes traces de poussières puis il est déionisé. Il peut alors être déposé sur la table aspirante de la machine puis immobilisé. Il subit un repositionnement par rapport aux structures à imprimer et le lancement de la fabrication a lieu. Les objets sont imprimés dans l'ordre où ils ont été définis dans la hiérarchie, toujours pour chacun de haut en bas et de gauche à droite.

VI.2. Mesures expérimentales après impression

La machine est équipée d'une caméra permettant d'observer les dépôts après impression. Aucune fissuration apparente n'est observée sur les dépôts avant cuisson. La Figure II- 16 présente quelques motifs observés.

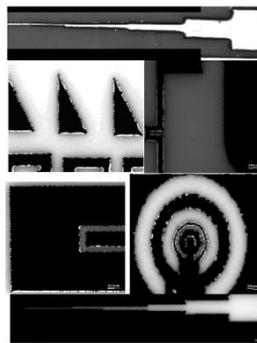


Figure II- 16: Micrographies de quelques motifs après impression, avant traitement thermique (pièce "cru")

Après impression, les dépôts sont ensuite traités thermiquement à 500 ou 600°C pendant 10 minutes dans un four infrarouge. Aucune fissuration apparente n'est décelée après analyse visuelle des motifs. La Figure II- 17 montre le motif global photographié.

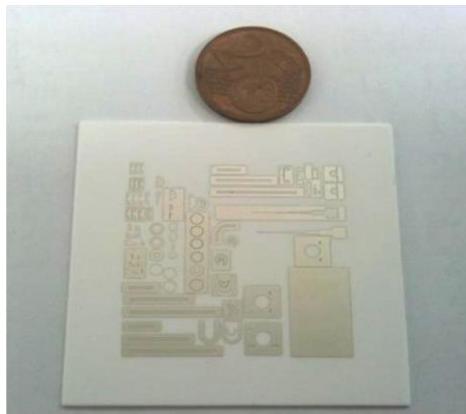


Figure II- 17 : Motifs de test après fabrication

Dans le but de déterminer la précision de fabrication de cette technologie, nous avons comparé l’écart entre les dimensions mesurées et leurs valeurs théoriques.

VI.3. Détermination des caractéristiques des dépôts

Pour les premiers essais, l’impression a été effectuée sur deux substrats, et sur les deux faces de chaque substrat.

Ces deux substrats ont été en particulier sélectionnés car ils présentent des rugosités très proches sur 2 de leurs faces. Ceci permettra plus facilement de décorrélérer l’impact de la rugosité sur la qualité de l’impression en comparant ces deux substrats.

Le Tableau II- 5 récapitule ainsi la configuration des premières impressions de ces motifs de test :

substrat	vitesse (mm/s)	Nombre de couches	Température (°C)	Rugosité (µm)
Sub 1, face 1	500	4	500	0,314
Sub 1, face 2	500	4	500	0,9541
Sub 2, face 1	500	4	600	0,3437

Tableau II- 5 : Caractéristiques des différents substrats

VI.3.1. Extraction de la conductivité de l’encre:

Pour caractériser l’encre et surtout pour vérifier la valeur de la conductivité trouvée lors de la caractérisation de notre résonateur, nous avons comparé la simulation et la mesure des lignes coplanaires.

La simulation de ces lignes a été faite sur Momentum d’ADS.

Pour une valeur de la conductivité égale à $2 \cdot 10^7$ S/m pour l’encre déposée, une permittivité et tangente de pertes prises respectivement pour les substrats d’Alumine de 9,1 et $1 \cdot 10^{-4}$, nous obtenons la réponse suivante (ligne de 5 mm de longueur) :

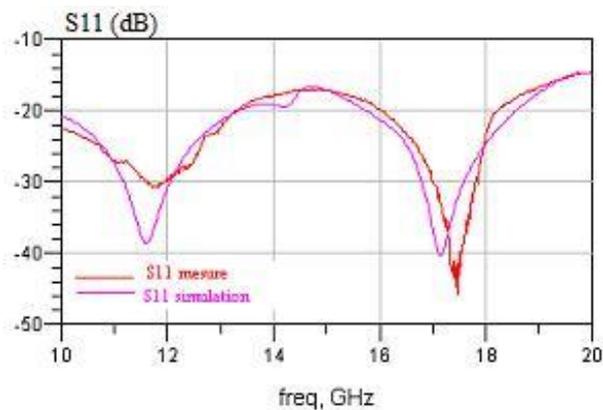


Figure II- 18 : Comparaison du paramètre S_{11} en simulation et mesure

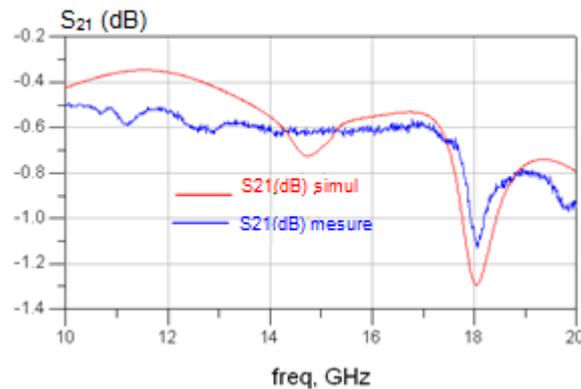


Figure II- 19 : Comparaison de S_{21} en simulation et mesure

Cette bonne concordance entre les paramètres S mesurés et simulés confirme la valeur de la conductivité de cette encre autour de 2.10^7 S/m.

VI.3.2. Tolérance de fabrication:

Globalement, les paramètres d'impression principalement regardés dans cette première phase concernent :

- la température de cuisson des dépôts,
- la rugosité des substrats,

La vitesse d'impression (500 mm/s) et les nombres de couche (4 couches) ayant été fixés dans un premier temps.

Les écarts moyens totaux relevés sur les substrats 1 et 2 (face 1 et face 2) sont récapitulés dans le Tableau II- 6 suivant :

substrat	Rugosité Ra lisse(μm)	Température de cuisson (°C)	Ecart moyen valeur mesurée – valeur théorique (μm)
1 face 1	0,314	500	16,5
1 face 2	0,954	500	19
2 face 1	0,344	600	18

Tableau II- 6 : Ecart moyen totaux sur les substrats 1 et 2

Ces résultats sont commentés dans les paragraphes suivants.

VI.3.2.1. Température de cuisson:

Lors de l'impression, la cuisson des deux substrats (n°1 et n°2) a été faite avec deux températures différentes, respectivement 500 et 600°C (vitesse d'impression et nombre de couches déposées identiques).

Ces deux substrats présentent une rugosité similaire sur leur face 1 (0,314 et 0,344 μm respectivement) et sur leur face 2 (0,954 et 0,948 μm respectivement). Les valeurs moyennes récapitulant l'ensemble des écarts entre les dimensions mesurées et celles demandées en pratique montrent que la différence, à rugosité similaire, entre les dépôts à températures de cuisson à 500 ou 600°C, est très faible.

VI.3.2.2. **Rugosité de surface :**

Systématiquement, les substrats fabriqués par SLA montrent une face moins rugueuse que l'autre.

Comme le montre le tableau précédent, l'impression sur une face ou une autre du substrat ne révèle pas énormément de différences sur la précision de fabrication. Les différents essais présentés précédemment amènent cependant comme tendance que les faces les moins rugueuses permettent un gain de quelques microns sur la précision de fabrication. Cette constatation conduit comme recommandation de préférer la face la moins rugueuse des pièces comme face à privilégier pour l'impression par jet d'encre.

Pour compléter cette conclusion, des simulations supplémentaires ont été effectuées sur des lignes coplanaires sur lesquelles une variation de $\pm 4\mu\text{m}$ est appliquée sur ses dimensions. Cette variation de 4 μm est celle observée sur le substrat n°1 sur la largeur des gaps entre une impression sur sa face 1 de rugosité 0,314 μm et sur sa face 2 de rugosité de 0,954 μm . Ces simulations réalisées sur ADS montrent ainsi qu'une même ligne imprimée sur la face 1 ou 2 présentera une variation d'impédance caractéristique de 1 Ohm d'une face à l'autre que l'on considèrera comme négligeable.

Ces valeurs sont cependant à nuancer par le fait d'une répartition non homogène de la rugosité à la surface d'un même substrat.

VI.3.2.3. **Impression de motifs d'excitation coplanaires :**

Les motifs de type coplanaire, typiquement utilisés pour l'excitation de résonateurs volumiques, ont particulièrement bien respecté des valeurs demandées, à $\pm 10\mu\text{m}$ en moyenne (des écarts maximum de plus de 30 μm ont cependant été ponctuellement observés). Une dissymétrie est cependant apparue et devra être prise en compte pour les prochains tests.

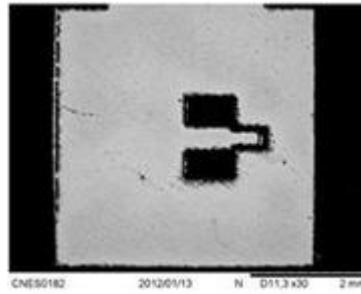


Figure II- 20: Motif d'excitation coplanaire

VI.3.2.4. Impression de lignes coplanaires :

Pour des paramètres d'impression identiques (rugosité, température de cuisson, ...) trois lots de trois lignes (petites, moyennes et grandes) ont été imprimées. Le relevé de leurs longueurs montre qu'elles varient en moyenne de $28\mu\text{m}$ d'un lot à l'autre, ce qui est à relier au degré de reproductibilité de la technologie d'impression employée.

VI.3.2.5. Impression de motifs circulaires :

Lors des tests d'impression, les motifs circulaires se sont révélés être les plus délicats à imprimer. Les anneaux positifs sont correctement réalisés (écart dimension réalisée – dimension demandée entre 9 et $20\mu\text{m}$ avec des écarts maximums typique de $31\mu\text{m}$), mais les anneaux négatifs ne voient leurs dimensions respectées en moyenne qu'entre 25 et $31\mu\text{m}$ (excursions maximales de $51\mu\text{m}$).

A noter que des anneaux pleins de $39\mu\text{m}$ de large ont été obtenus au mieux. Sur leur version négative, des gaps minimum de $40\mu\text{m}$ ont été atteints.

VI.3.2.6. Test des largeurs et gaps minimaux :

Les formes rectangulaires basiques sont très correctement imprimées avec un écart moyen de $11\mu\text{m}$ entre dimensions mesurées et dimensions demandées. Une ligne de $32\mu\text{m}$ de large a ainsi été réalisée et est pour l'instant la largeur la plus petite atteignable. A noter que pour cette dernière la valeur théorique demandée était de $31\mu\text{m}$.

Concernant les gaps (zone non métallisée entre deux zones métalliques), la plus faible valeur atteignable est de $38\mu\text{m}$ pour une valeur demandée de $50\mu\text{m}$.

Ces valeurs **sont nettement plus faibles que pour les technologies de type sérigraphie, ce qui permet, au-delà** du coût de réalisation réduit, de situer l'intérêt de cette technologie jet d'encre en termes de précision de réalisation.

VI.4. Epaisseur des dépôts

Le véhicule de test a ensuite été mesuré au profilmètre afin de vérifier le profil de l’épaisseur déposée. La technologie jet d’encre nous permet d’imprimer différentes épaisseurs sur le même substrat. La Figure II- 21 décrit le nombre de couches utilisé pour les différents motifs.

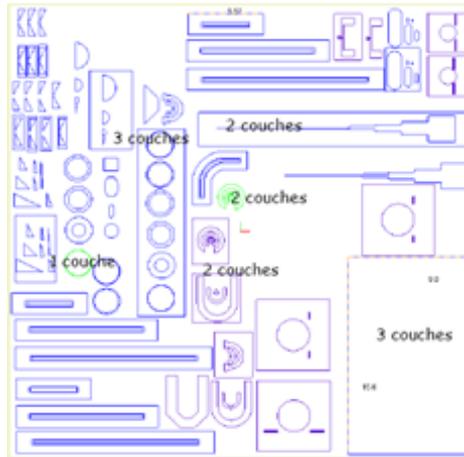


Figure II- 21 : Variations du nombre de couches sur le substrat

L’épaisseur théorique d’une couche crue est de $3\mu\text{m}$. Lors de la cuisson, il est attendu que cette couche perde 20% de son épaisseur ($-0,6\mu\text{m}$ typiquement). Cette valeur est confirmée par l’épaisseur moyenne observée qui est de $2,4\mu\text{m}$. A noter que l’épaisseur obtenue après l’impression de deux couches successives est proche de $5,3\mu\text{m}$ (Tableau II- 6).

Motif imprimé	Epaisseur des dépôts sur le substrat 1(μm)	Epaisseur des dépôts sur le substrat 2 (μm)
Paquet 1, ligne petite (1 couche)	2,2	2,1
Paquet 2, ligne grande (1 couche)	2,1	2,3
Paquet 3, ligne moyenne (1 couche)	2,6	2,8
Motif rectangulaire (2 couches)	5,1	5,5

Tableau II- 7: Les épaisseurs des motifs

VI.5. Conclusion

Ces tests nous permettent de définir quelques caractéristiques des dépôts, et donc des règles de conception pour l’utilisateur, pour une rugosité des supports utilisés donnée :

- Largeur de ligne minimale : $32\mu\text{m}$

- Dimension minimale d'un gap entre 2 conducteurs : $38\mu\text{m}$
- Précision de réalisation d'un conducteur métallique : $11\mu\text{m}$
- Conductivité de l'encre utilisée : $\sim 2.10^7 \text{ S/m}$
- Epaisseur de métallisation : $N * 2.4 \mu\text{m}$ (N nombre de couches).

VII. Impression des composants Multi-matériaux

L'objectif principal de cette étude est d'imprimer des composants multi-matériaux en 3D. Pour atteindre cet objectif, il faut choisir et adapter une ou des encres diélectriques, d'une part avec la machine d'impression jet d'encre, d'autre part pour que ces encres soient compatibles avec un frittage à basse température pour des céramiques (800°C).

Ce travail de choix et de conditionnement des matériaux a été mené en lien avec Guillaume Divita (post-doctorant) et le Pr. Thierry Chartier (DR CNRS) du SPCTS.

Nous décrivons maintenant la démarche suivie pour le choix des matériaux retenus.

La technologie d'impression par jet d'encre impose des caractéristiques spécifiques de la suspension céramique. Elle doit être réalisée dans de l'eau, mais peut contenir tout type de dispersant. Le diamètre de buse ($50 \mu\text{m}$) des têtes d'impression impose une limite maximale de taille des particules céramiques ($d_{\text{max}} < 1,2 \mu\text{m}$).

La suspension réalisée doit de plus impérativement répondre aux caractéristiques suivantes :

- Concentration de la suspension : $20 \%_{\text{vol}}$ à $25\%_{\text{vol}}$
- Viscosité : $2 < \eta < 10 \text{ mPa.s}$ (1000 s^{-1} , 20°C)
- Tension de surface : $< 40 \text{ mN/m}$
- Masse volumique : $2 \pm 0,5 \text{ g/cm}^3$
- Conductivité : $< 15 \text{ mS/cm}$

Des tests de sédimentation sont également à effectuer afin d'évaluer la stabilité de la suspension.

Différents matériaux utilisés dans le procédé LTCC ont été sélectionnés sur la base de ces contraintes :

- La céramique 51k65 produite par Hereaus sous forme de poudre et dont les propriétés théoriques sont $\epsilon_r = 68$ et $\tan \delta = 1,2 \cdot 10^{-3}$ à 10 GHz

- La céramique 9K7 produite par Dupont dont les performances théoriques sont : $\epsilon_r=7,1$ et $\tan \delta= 10^{-3}$ à 10 GHz. Ce matériau est fourni sous forme de bandes crues.

La seconde céramique n'a pu être mise en forme pour le procédé jet d'encre : la taille des grains est restée trop importante avec les procédures de broyage utilisées.

Nous présentons ici les travaux développés sur l'encre Heraeus 51K65.

Pour élaborer une suspension répondant au cahier des charges, il est d'abord nécessaire de travailler avec une poudre de granulométrie définie. La poudre 51K65 produite par la société Heraeus présente une granulométrie initiale proche de celle souhaitée.

La distribution granulométrique de cette poudre est monomodale, centrée autour d'un diamètre moyen de 1 μm . La Figure II- 22.a montre la présence de deux populations, des grains élémentaires d'un diamètre moyen inférieur à 0,5 μm , des agglomérats et quelques grains de 1 à 2 μm de diamètre (Figure II- 22.b).

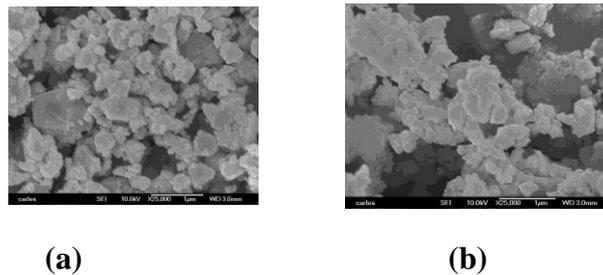


Figure II- 22 : Micrographies MEB de la poudre 51K65 à différentes échelles (a), (b).

Ces valeurs indiquent qu'un broyage est nécessaire pour casser les agglomérats et pour atteindre les contraintes granulométriques imposées par la compatibilité au procédé jet d'encre ($d_{\text{max}} < 1,2 \mu\text{m}$).

Les propriétés diélectriques d'un matériau massif dense élaboré à partir de la poudre précédemment triée ont alors été mesurées. Pour ce faire, la poudre a été mélangée par voie liquide à un liant (LP51/03, Evonik, Allemagne) et à un plastifiant (Dibuthylphtalate, Acros, Belgique). Elle a ensuite été mise en forme par pressage uniaxial puis densifiée selon le cycle thermique suivant :

- montée en température jusqu'à 600°C à 5°C/min
- palier de déliantage à 600°C pendant 1 h
- montée en température jusqu'à 1000°C à 5°C/min

- palier de frittage à 1000°C pendant 1 h
- descente en température à l'ambiante à 20°C/min.

La pastille obtenue présente alors une densité relative de $99 \pm 1 \%$, mesurée par poussée hydrostatique. Afin de valider la pertinence de ce matériau (en parallèle des propriétés physico-chimiques de la poudre utilisée), des résonateurs diélectriques de petite taille ont été frittés dans ce matériau par le SPCTS et caractérisés par XLIM à l'aide de techniques standards de caractérisation par résonance dans des cavités de Cuivre.

Nous avons décidé de fabriquer un résonateur en forme de pastille. Ce résonateur placé dans une cavité cylindrique en Cuivre est bien modélisable par la méthode des éléments finis.

La caractérisation du comportement en fréquence a été réalisée. Le Tableau II- 8 présente les valeurs de tangente de pertes et permittivité mesurées, ainsi que les valeurs annoncées par le fournisseur.

	F (GHz)	Tangente de pertes	Permittivité
Fournisseur	1 MHz	$< 1.10^{-2}$	61-67
Mesuré	1,824 GHz	$1,20.10^{-3}$	68
	10,711 GHz	$1,84.10^{-3}$	64,2

Tableau II- 8 : Comportement en fréquence du matériau Hereaus 51K65

Le matériau présente une permittivité forte entre 64 et 68, mais ses pertes sont assez élevées ($1,2 \cdot 10^{-3}$) en contrepartie. La possibilité d'imprimer une couche diélectrique de forte permittivité est particulièrement intéressante pour le création de capacités compactes qui peuvent présenter des valeurs importantes, ce matériau est donc d'intérêt.

VIII. Capacité MIM Multicouche

Nous présentons une capacité MIM (métal, isolant, métal) afin de valider la capacité du procédé utilisé à réaliser une structure multicouche, de vérifier par une autre méthode la permittivité et la tangente de pertes attendues de la couche diélectrique. Nous estimons enfin la valeur de la capacité imprimée.

VIII.1. Définition

Les capacités MIM sont des condensateurs plans constitués d'une couche isolante entre deux couches métalliques, les électrodes, constituant les armatures du condensateur (Figure II- 23). Lorsque l'on applique une différence de potentiel V entre ces deux armatures,

le condensateur se charge et il apparaît une charge $Q = CV$, où C est la capacité du condensateur.

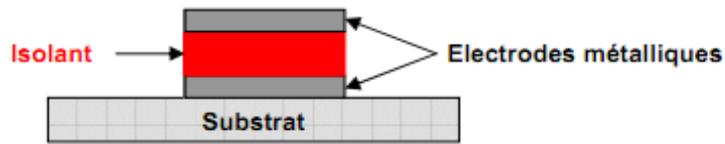


Figure II- 23 : Schéma d'une capacité MIM

La capacité de ce condensateur plan prend, en négligeant les effets de bord, la valeur $C = \epsilon_0 \epsilon_r S / e$.

avec :

- ϵ_0 , la permittivité du vide ($1/(36\pi \cdot 10^9)$ F.m⁻¹ soit $8,854 \cdot 10^{-12}$ F.m⁻¹)
- ϵ_r , la constante diélectrique relative du matériau
- S , la surface des électrodes en regard
- e , l'épaisseur de l'isolant.

Cette structure est conçue pour permettre d'effectuer une mesure en fréquence de son impédance d'entrée (Z_{11}), et ainsi de pouvoir en extraire la permittivité et la tangente de pertes de la couche d'Heraeus, la conductivité des dépôts d'argent ayant été mesurée précédemment ($2 \cdot 10^7$ S/m). Pour cela, la capacité réalisée par CERADROP présente un accès coplanaire relié à l'électrode inférieure. L'électrode supérieure sera elle reliée à la masse pour la mesure (Figure II- 24).

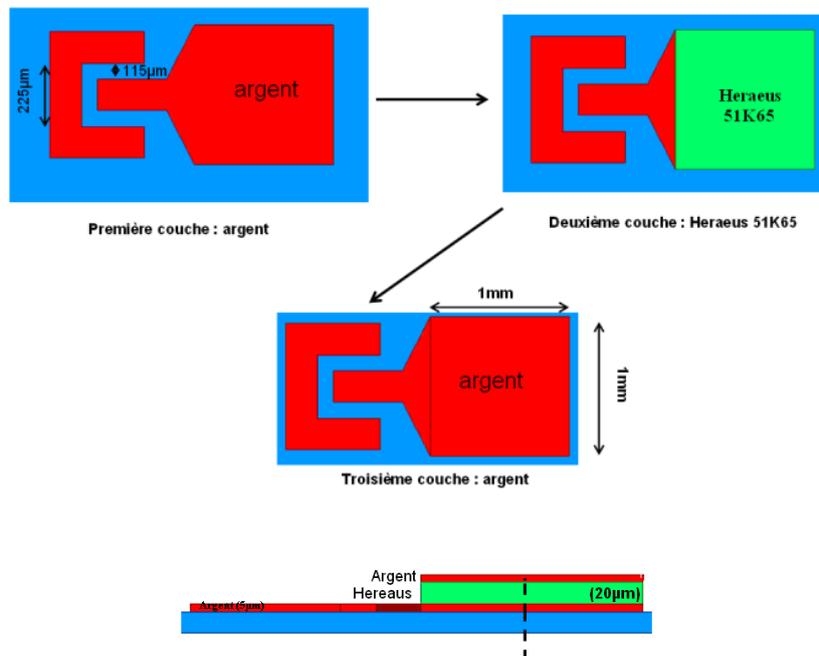


Figure II- 24 : Capacité MIM avec accès coplanaires

La mesure du composant est réalisée à l'aide d'une station sous pointes. L'espacement des pointes est de 250 μ m.

Trois dimensions de capacités ont été imprimées : 1mm x 1mm , 2mm x 2mm et 3mm x 3mm. Les valeurs attendues de ces capacités sont respectivement : 30 pF, 120pF et 270 pF.

VIII.2. Impression des couches de matériaux céramiques de type Heraeus

Les premiers tests d'impression de la seule couche d'encre diélectrique consistent à imprimer une couche 3mm x 3mm et d'une épaisseur de 380 μ m. L'impression et le frittage de ces blocs diélectriques est effectuée sur un substrat d'Alumine Rubalit 708s. Lors de ce premier essai d'impression d'encre diélectrique, 200 couches ont été nécessaires avec l'épaisseur moyenne de chaque couche déposée de 1,9 μ m.



Figure II- 25 : Impression d'une couche d'Heraeus

Deux limitations sont apparues :

- Malgré la présence de filtres en polypropylène, les buses finissent par se boucher lors de l'impression d'un très grand nombre de couches. Pour contourner ce problème, il faudrait arrêter l'impression au bout d'une centaine de couches et effectuer un nettoyage complet du système, ce qui se révèle long et peu pratique.
- Ensuite le frittage à 900°C pendant 3 heures de cette forte épaisseur de diélectrique a fait apparaître des fissures importantes au sein du dépôt.

Ce test nous a permis de connaître les limites de cette technologie pour le dépôt de cette encre diélectrique surtout au niveau de son épaisseur. Pour les composants présentés prochainement, nous choisirons de rester, dans la mesure du possible, avec des dépôts de 20 μ m d'épaisseur pour la couche diélectrique afin d'éviter la présence de fissures pendant le frittage et de limiter les retraits en x-y de ces dépôts (quasi inexistant si la couche diélectrique reste fine).

A noter que ces paramètres sont optimisés pour un dépôt sur un substrat d'Alumine Rubalit 708s ; ce substrat a été choisi pour éviter les soucis rencontrés avec les substrats issus de la SLA : en effet ces premiers sont rectifiés en surface et présentent une rugosité homogène de 0,5 μ m.

VIII.3. Impression des couches de matériaux métalliques

L'objectif étant l'impression multicouche d'encre métallique et diélectrique, il est important de maîtriser les retraits de chaque matériau lors de l'étape de frittage, pour éviter la fissuration des dépôts. Une étape de dopage d'encre métallique a ainsi été menée pour rendre compatibles les retraits à la cuisson des couches métalliques et diélectriques. Ce dopage est effectué par :

- ajout d'un agent d'adhésion dans l'encre pour permettre une bonne adhésion de la couche métallique et du composant sur le substrat d'Alumine
- ajout du matériau diélectrique dans l'encre métallique pour accorder les retraits entre les deux matériaux.

Pour déterminer la conductivité de l'encre dopée, nous avons imprimé un carré de 20 x 20mm² en argent dopé, et par ailleurs des lignes coplanaires (Figure II- 26).

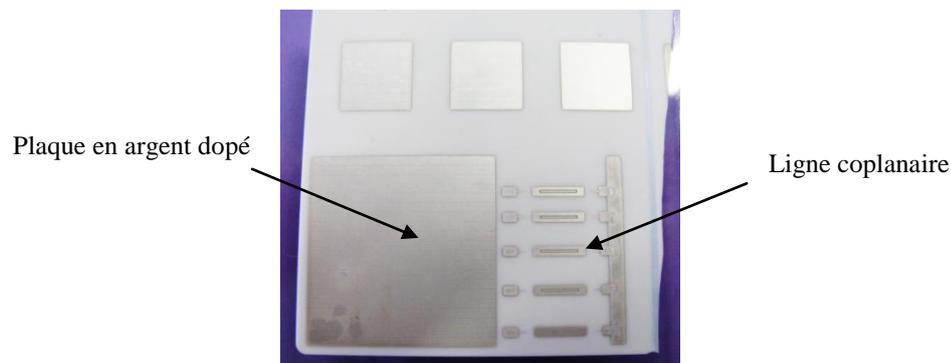


Figure II- 26 : Caractérisation d'encre métallique dopée

Nous avons caractérisé la conductivité de l'encre d'argent imprimée expérimentalement avec l'aide d'une méthode en cavité cylindrique. La plaque en argent dopé est placée à l'extrémité d'une cavité métallique en Cuivre. Nous avons dans un premier temps mesuré la fréquence et le facteur de qualité du mode TE₀₁₁ de ce résonateur fermé sur sa face supérieure par une plaque en Cuivre, de même conductivité que le reste de la cavité. Ce dispositif est couplé faiblement par des sondes coaxiales, pour permettre l'extraction simple et

précise du facteur de qualité à vide. Par une phase de retro-simulation avec un modèle numérique électromagnétique, nous en déduisons la conductivité équivalente globale de la cavité en Cuivre. Pour trouver la conductivité de cette encre imprimée, nous avons placé ce substrat métallisé dans un second temps à une extrémité de la cavité. Le fait de remplacer le capot de la cavité cylindrique par la plaque d'argent a pour conséquence de modifier le facteur de qualité du même mode TE_{011} , choisi du fait de sa faible sensibilité aux défauts de contact. Après une phase de rétro-simulation, nous avons déduit que l'argent imprimé sur le substrat avait une conductivité de l'ordre de $\sigma = 44 \text{ S}/\mu\text{m}$.

Pour confirmer la valeur de cette conductivité largement supérieure à celle rencontrée précédemment, nous avons mesuré les lignes coplanaires imprimées avec la même encre et les mêmes paramètres d'impression. La simulation de ces lignes a été faite sur Momentum. Pour une valeur de la conductivité $\sigma = 4,5.10^7 \text{ S/m}$ de l'encre déposée, nous obtenons une réponse simulée en bon accord avec celle mesurée (Figure II- 27) :

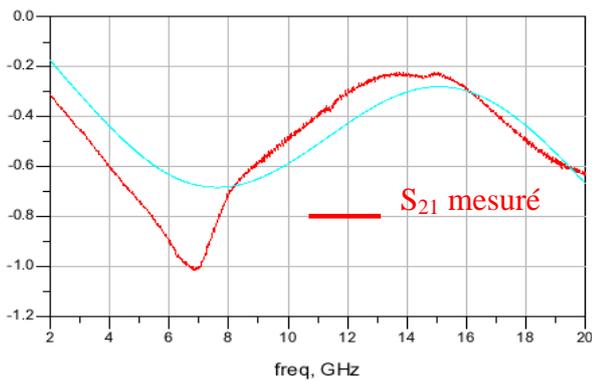


Figure II- 27.a : Comparaison de S_{21} simulation et mesure

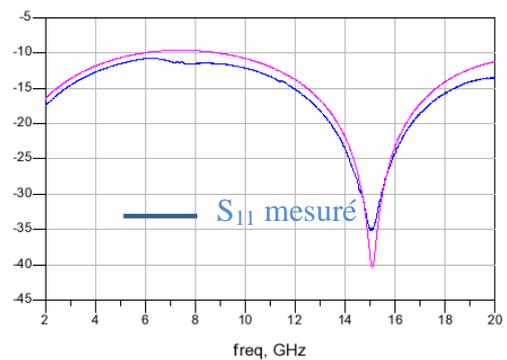


Figure II- 27.b : Comparaison de S_{11} simulation et mesure

L'amélioration des valeurs de conductivités obtenues pour une encre dopée par rapport aux encres initiales non dopées ($\sigma = 20 \text{ S}/\mu\text{m}$) peut s'expliquer par les différences de températures de cuisson et de cycle thermique. Pour rappel, dans les premiers essais, une température de 600°C était utilisée pendant 10 minutes. Alors que pour l'encre dopée, une température de 900°C est atteinte pendant plusieurs heures.

VIII.4. Cofrittage multimatériaux

La Figure II- 28 suivante montre une des capacités réalisées sur la base de l'impression des deux matériaux.

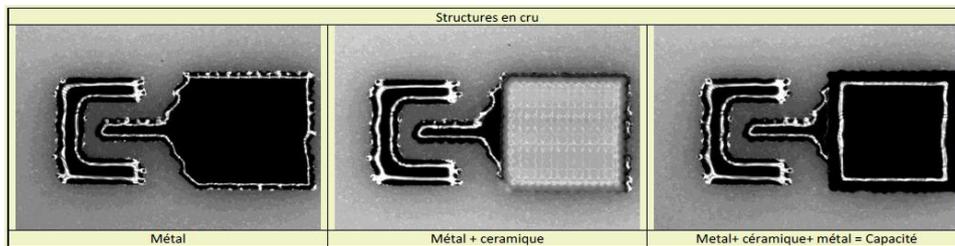


Figure II- 28 : Capacité MIM 1x1 mm² en crue lors des différentes étapes de dépôt

Après impression, une étape de cocuisson est réalisée. Les caractéristiques de cette cuisson, optimisée par la société CERADROP, sont présentées dans le Tableau II- 9 suivant :

Matériau	Diélectrique
Type de cuisson	Heraeus Rapide (Déliantage + Frittage)
T Déliantage (°C)	500
Palier déliantage	30min
Rampe montée frittage (°/mi.)	3
T frittage	900
Palier (H)	3
Rampe de descente (°/min)	3
Rampe montée déliantage (°/min)	2

Tableau II- 9: Cocuisson de l'encre métallique et diélectrique

Les capacités frittées sont robustes et ne présentent aucune fissuration. Malheureusement seules les capacités 1mmx1mm sont mesurables, l'espacement entre les doigts de la zone coplanaires étant trop important sur les capacités 2 mm x 2 mm et 3 mm x 3 mm pour permettre leur mesure.

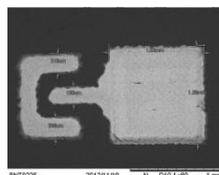


Figure II- 29 : Capacité MIM après impression (1mmx1mm)

Les composants de surface nominale 1 mm x 1mm ainsi imprimés sur substrat d'Alumine ont tout d'abord été mesurés géométriquement afin de vérifier leurs dimensions. Les paramètres relevés sont présentés sur la Figure II- 30.

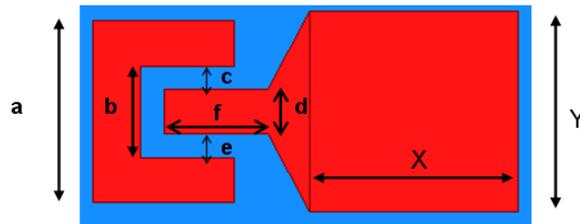


Figure II- 30 : Récapitulatif des dimensions relevées sur les capacités.

Les écarts relevés entre les dimensions souhaitées et les dimensions obtenues après frittage peuvent aller jusqu'à 85 μm , la moyenne se situant aux alentours de +/- 50 μm .

Les 24 capacités ont été mesurées en utilisant des pointes coplanaires sur une plage de fréquences allant de 4 à 22 GHz. Les résultats obtenus sur l'impédance d'entrée sont visibles sur la Figure II- 31.

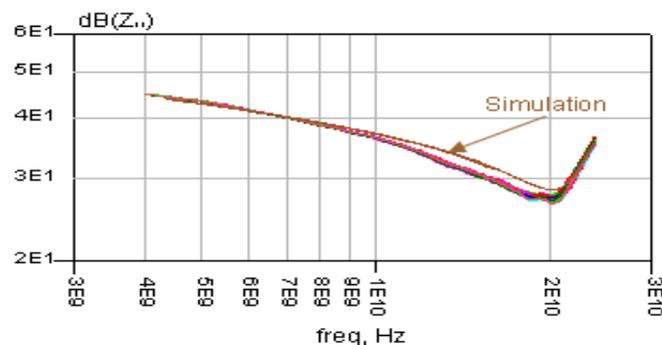


Figure II- 31: Impédance d'entrée Z_{11} en fonction de la fréquence

Les résultats de la Figure II- 31 montrent une bonne reproductibilité. A l'aide de rétro-simulations effectuées sur HFSS en intégrant les dimensions moyennes relevées sur ces capacités, les valeurs suivantes concernant la couche de diélectrique Heraeus 51K65 sont extraites autour des 20 GHz :

- permittivité = 63,3
- $\tan \delta = 2,1 \cdot 10^{-3}$

Ces résultats de permittivité complexe sont plus faibles de ceux obtenus par la caractérisation du RD mais s'expliquent par la différence de fréquence de caractérisation, par une densité du dépôt céramique moindre par rapport à celle du RD et un cycle de cuisson spécifique à chaque procédé.

Par ailleurs, l'utilisation d'un profilomètre a permis de relever une épaisseur moyenne des couches d'argent de 5 μm et une épaisseur de la couche de diélectrique de 20 μm (Figure II- 32).

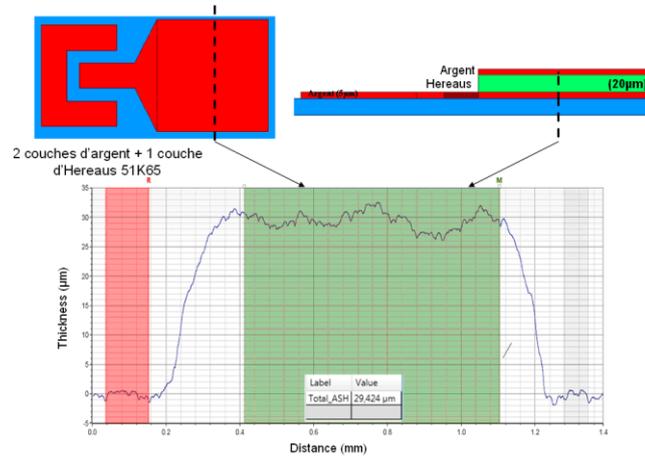


Figure II- 32: Relevé au profilomètre de l’empilement des couches (2 couches d’argent + 1 couche de céramique)

Un autre type de mesure d’épaisseur a été effectué avec un interféromètre (Figure II- 33)

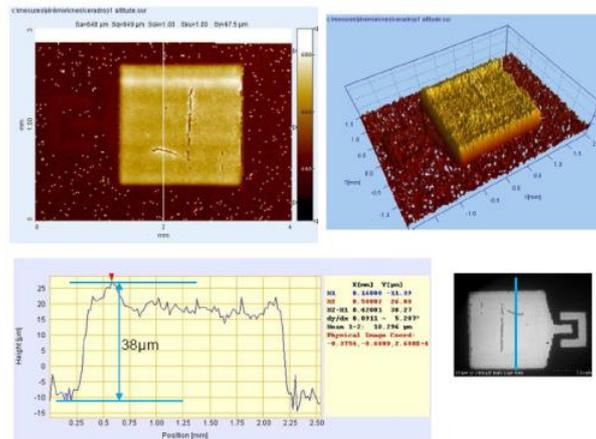


Figure II- 33: Relevé à l’ interféromètre de l’empilement des couches (2 couches d’argent + 1 couche de céramique).

L’interférométrie (instrument Fogale) fournit des résultats plus précis sur le matériau déposé par jet d’encre (meilleure définition des fissures) mais la zone d’intérêt est plus petite.

Ainsi, les rétro-simulations ont permis de remonter à une valeur de capacité expérimentale de 27 pF pour ce composant de dimension moyenne 1 mm (+/- 22 µm) x 1 mm (+/- 32 µm) x 20 µm. Cette valeur reste proche des 30 pF attendus.

Cette première impression multicouche a ainsi été validée, ce qui va nous permettre d’imprimer des structures plus complexes qui seront présentées dans les paragraphes et le chapitre suivants.

IX. Résonateur SIW (Substrate Integrated Waveguide)

Les résonateurs SIW [11] associent une réalisation en technologie planaire, précise et à faible coût, et des performances électriques qui se rapprochent des solutions volumiques en cavité : c'est ce qui fait l'intérêt de cette solution, sur laquelle de nombreux groupes travaillent depuis le début des années 2000.

IX.1. Résonateurs SIW en technologie LTCC

Des cavités volumiques sont fabriquées dans un substrat limité par des vias métallisés, et par une métallisation de la face inférieure et extérieure. Avec ce type de résonateur, on peut atteindre un facteur de qualité variant typiquement de 300 à 500, en fonction de la fréquence de travail et du choix du substrat diélectrique. Cette valeur est ainsi élevée par rapport à celle d'un résonateur planaire ($Q_0 \sim 100-150$), pour un encombrement qui reste proche. Elle reste cependant donc inférieure à celle d'un résonateur volumique, mais qui est lui plus grand en taille. La Figure II- 34 présente un exemple de filtre SIW [12].

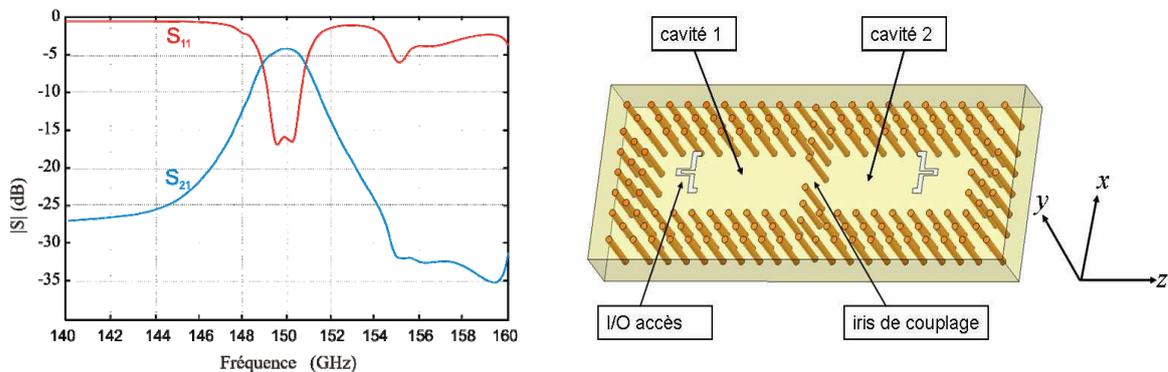


Figure II- 34 : Réponse EM du filtre deux pôles

Ces vias, délimitant la surface occupée par ces résonateurs, doivent avoir un diamètre et un espacement suffisamment faibles pour apparaître comme des murs électriques réels parfaits à la fréquence de résonance du mode considéré. Cependant, la substitution de murs électriques réels par des trous métallisés implique que certains modes ne peuvent pas résonner (lorsque leur champ électrique est perpendiculaire à l'axe des vias, ce qui est le cas des modes TM en particulier). L'excitation des cavités se fait grâce à une transition adaptée au mode à exciter. Ainsi, le circuit peut facilement être connecté aux autres éléments de façon planaire pour les modes TE typiquement utilisés.

Le filtre présenté Figure II- 34 a été fabriqué par le centre de recherche technique VTT (Finlande) à l’aide de la technologie LTCC. Le matériau diélectrique utilisé est le Ferro A6-S. Ses propriétés électriques sont caractérisées dans la bande 49 – 69 GHz [13]. Les valeurs obtenues sont 5,99 pour la permittivité et 0,0015 pour la tangente de pertes.

Les mesures réalisées sur ce filtre sont présentées sur la figure II-34. Ce filtre nous servira de référence pour qualifier la qualité de réalisation d’un dispositif similaire réalisé par le procédé jet d’encre.

IX.2. Résonateurs SIW en technologie jet d’encre

Afin de comparer la technologie jet d’encre par rapport au LTCC, une configuration de résonateur de type cavité SIW a été retenue et devrait permettre d’atteindre une bonne compacité grâce à la forte permittivité de la céramique Heraeus 51K65 qui constituera le diélectrique de cette cavité SIW. Cette structure simple est simulée sur HFSS, avec des dimensions compatibles avec notre technologie.

La Figure II- 35.(a) montre l’enchaînement des couches diélectriques et métalliques et les dimensions de cette structure. Pour ces simulations, nous avons utilisé les valeurs 63,3 pour la permittivité diélectrique et une tangente diélectrique de pertes $2,1 \cdot 10^{-3}$ (en accord avec les caractérisations des paragraphes précédents). Pour les dimensions présentées sur la Figure II- 35.(a, c), le résonateur résonne à 10 GHz sur le mode TE_{101} (Figure II- 35.(b)).

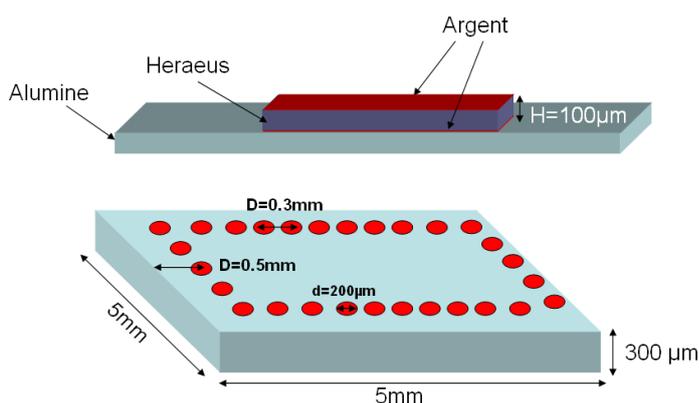


Figure II- 35 : (a) Structure SIW standard.

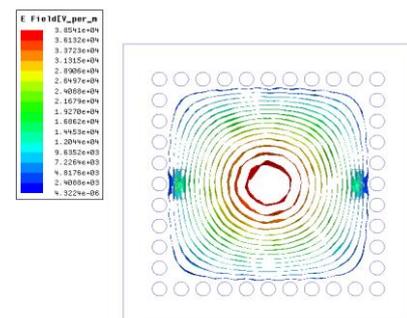


Figure II- 35 : (b) Simulation du mode TE101

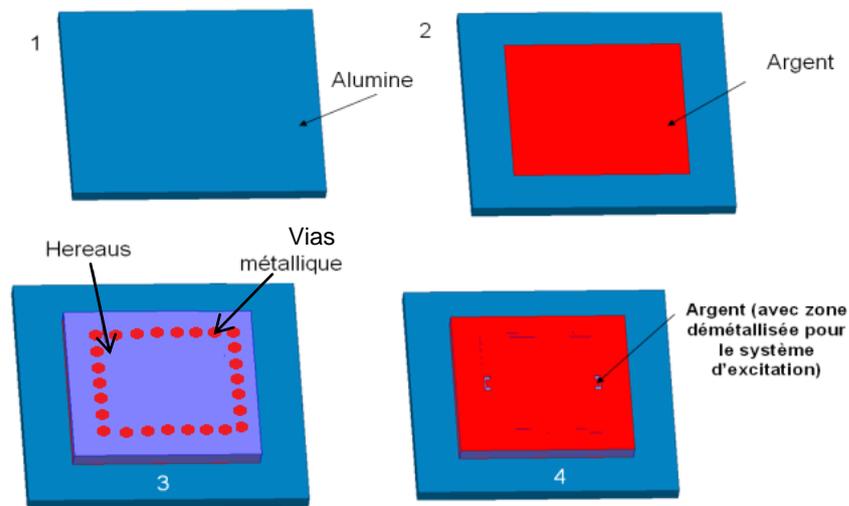


Figure II- 35 : (c) Structure SIW à vias métalliques, hiérarchie des couches d'impression

La valeur du facteur de qualité augmente de 120 à 300 avec la hauteur du résonateur variant de 0,1mm à 0,4mm comme le montre la courbe de la Figure II- 36.

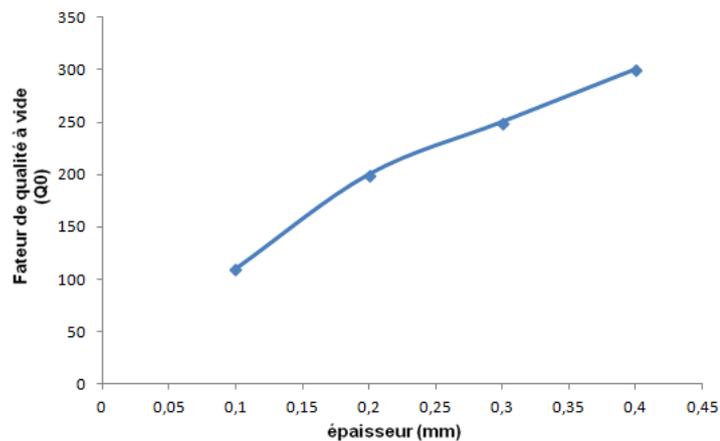


Figure II- 36: Variation du facteur de qualité en fonction de l'épaisseur du résonateur

Après impression d'un résonateur d'épaisseur totale de 310 μ m, des couches homogènes sans fissuration sont observées en crue (Figure II- 37). Malheureusement, lors de l'étape de frittage, des fissures très importantes apparaissent aux interfaces métal-diélectrique (au niveau des vias en particulier), ce qui la rend inutilisable. Le problème réside dans le fait que les encres métalliques et diélectriques présentent des coefficients de retrait à la cuisson (Figure II- 38) qui sont trop différents, en particulier du fait de la couche épaisse de diélectrique utilisée ici (300 μ m).

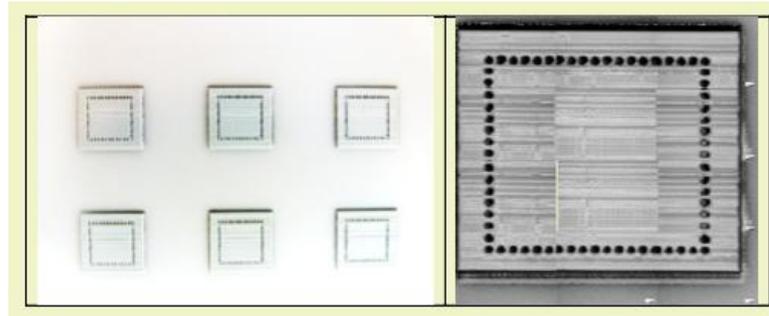


Figure II- 37: Structures SIW "cruées"

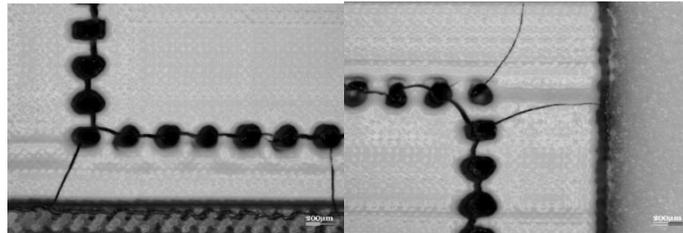


Figure II- 38: Structures SIW dans la minute qui suit la fabrication

Les rangées de vias classiques ont été, dans une seconde étape, remplacées par des murs métalliques pleins. Ces murs présentent typiquement une configuration qui ne peut pas être fabriquée avec la technologie LTCC, et qui est d'intérêt pour limiter les fuites par rayonnement, ou conforter mécaniquement les dispositifs. La technologie jet d'encre permet de réaliser ces parois métalliques verticales : sur un même plan horizontal, des buses vont déposer le matériau diélectrique, alors que d'autres déposeront le matériau métallique. Il était d'intérêt dans le cadre de cette étude, au-delà de la seule application au résonateur SIW, de valider cette brique technologique. La Figure II- 39(b) montre les dimensions nécessaires pour obtenir une résonance à 10 GHz sur le mode TE_{101} .

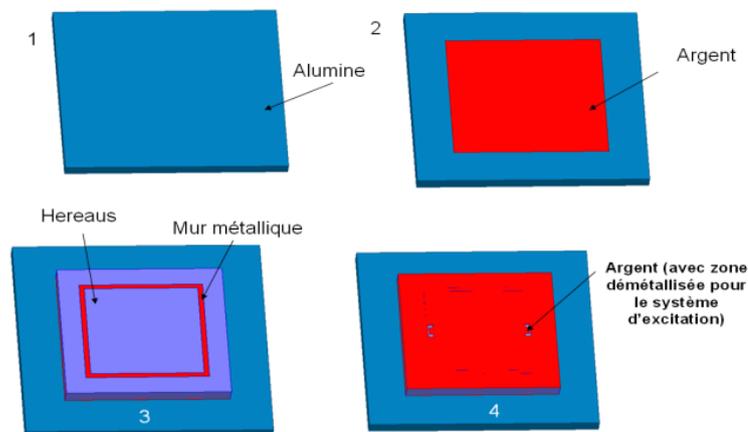


Figure II- 39: (a) Structure SIW à murs métalliques pleins : hiérarchie des couches d'impression

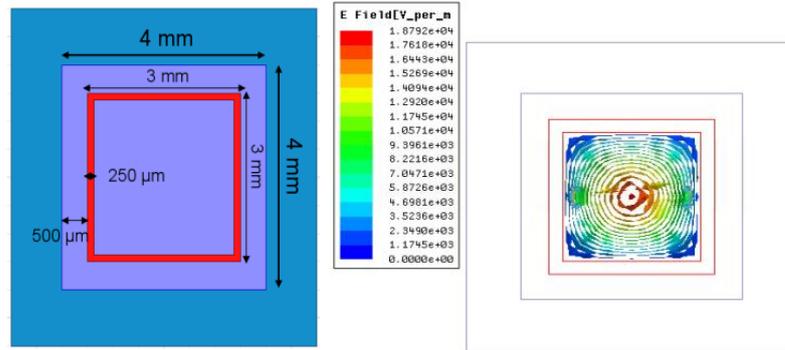


Figure II- 39 : (b) Dimensions et champ électrique à mi-hauteur à 10 GHz

Le facteur de qualité simulé est de même niveau pour cette paroi pleine qu'en utilisant des vias (pour une structure similaire avec des vias, le facteur de qualité varie entre 70 à 250 pour une variation de hauteur de 100 à 400μm).

Il est à noter qu'à même mode (TE_{101}), même fréquence et épaisseur identique, un résonateur réalisé en technologie LTCC avec le matériau Ferro A6-S verra le facteur de qualité doublé par rapport à celui obtenu pour le résonateur avec le matériau Heraeus 51K65. La compacité du résonateur à forte permittivité se fait au détriment du facteur de qualité.

Cette structure a été imprimée par la société CERADROP. Elle est visible en crue puis frittée sur les figures Figure II- 40 et Figure II- 41 .

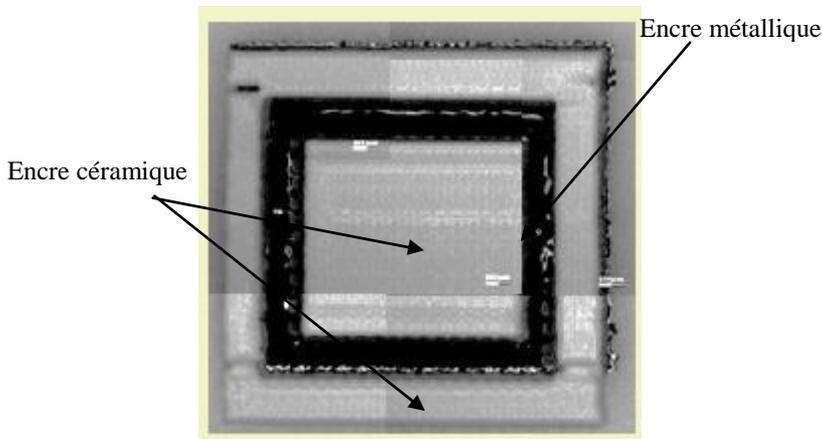


Figure II- 40:Photo du résonateur SIW à murs pleins en crue.

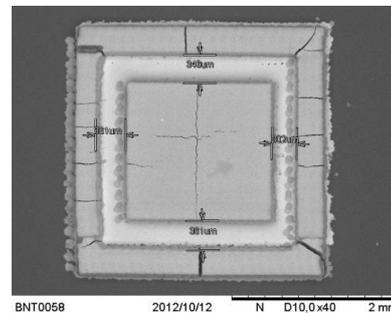


Figure II- 41 : Photo du résonateur SIW à murs pleins après cuisson.

Encore une fois, le frittage de la pièce a malheureusement provoqué des fissures entraînant des dommages ne rendant pas mesurable cette structure.

L'utilisation de telles structures s'avère donc pénalisée par deux facteurs :

- une tangente de pertes du matériau Heraeus trop forte pour obtenir des facteurs de qualités importants. Ce point est cependant compensé par la compacité du résonateur.
- des soucis de retraits différents lors de la cuisson des encres métalliques et diélectriques. Des études supplémentaires sur le procédé technologique doivent être menées pour apporter une solution à ce second point, la charge céramique apportée à l'encre métallique n'a pas été suffisante pour résoudre ce problème.

X. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une technologie innovante développée par la PME CERADROP : la technologie jet d'encre appliquée au dépôt de matériaux céramiques et métalliques. Avec cette technologie, différents motifs ont été imprimés avec l'objectif de caractériser cette technologie et définir des tolérances de fabrication typiques.

Pour ce qui concerne le dépôt d'encre métallique (2D), les différents tests montrent en particulier qu'il est possible d'imprimer un gap entre deux lignes de $38\mu\text{m}$. La tolérance de fabrication typique observée est de $\pm 24\mu\text{m}$. Cette technologie, en plus de la flexibilité apportée pour la réalisation de structures 3D, permet d'aller au-delà de ce qu'autorise la technique par sérigraphie, classiquement utilisée par le procédé LTCC par exemple.

L'extraction de la valeur de la conductivité de l'encre argent a été effectuée par deux techniques différentes : cette encre une fois frittée à $800\text{ }^\circ\text{C}$ présente une bonne valeur, variant de $20\text{ S}/\mu\text{m}$ à $45\text{ S}/\mu\text{m}$ pour une encre chargée de diélectrique.

Le but de ce travail est cependant d'imprimer des objets multicouches et multi-matériaux. Pour cette raison, nous avons présenté dans ce chapitre une étude sur la mise au point d'une encre diélectrique à partir de la céramique de type LTCC Hereaus 51K65. Cette encre a été synthétisée par le SPCTS afin d'être compatible avec le système d'impression de CERADROP. Grâce à sa température de frittage de $900\text{ }^\circ\text{C}$, elle peut être cofrittée avec l'encre argent testée tout en conservant de bonnes propriétés conductrices.

Un premier essai d'impression multi-matériaux est présenté au travers de l'impression de capacités MIM pour arriver à extraire les caractéristiques de cette encre diélectrique. Nous avons pu extraire pour la couche diélectrique, une permittivité relative de 63,3 avec une tangente diélectrique de pertes de 2.10^{-3} .

Avec ces capacités, le principe de l'impression multicouche a été validé ainsi que la cuisson de l'encre métallique et diélectrique à $900\text{ }^\circ\text{C}$, à condition que l'épaisseur des couches diélectriques reste fine ($\sim 20\mu\text{m}$) pour éviter des phénomènes de craquelure à la cuisson.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter un filtre interdigité dans lequel on vient introduire des capacités multicouches réalisées par jet d'encre, pour réduire fortement sa taille.

En fin de chapitre, nous avons montré qu'un travail sur le procédé reste cependant à effectuer pour maîtriser la réalisation de couches céramiques épaisses associées à des surfaces métallisées ou parois métalliques : les différences de retrait, malgré la charge céramique de l'encre métallique, entraînent des fissurations lors du frittage des pièces.

XI. Références chapitre II

-
- [1]R. Noguera, Thèse de l'Université de Limoges, 2004
- [2]R. Noguera, M. Lejeune, T. Chartier, M. Oudjedi, brevet français n° 03 10300, 29 août
- [3]Strutt , J.W, Lord Rayleigh., “On the instability of jets proceedings of the London mathematical society” , in Proc. London Math. Vol. 10, 1878
- [4]Richard G. Sweet, High Frequency Recording with Electrostatically Deflected Ink Jets, rev. Sci. Instrum. 36: 131, 1965.
- [5]Le HUE P. Le, “Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology”, Journal of Imaging Science and Technology, volume 42, number 1, 1998
- [6]HERTZ CH. and SIMONSSON S.I., Ink-jet recorder, USA, 1968
- [7]Amin Rida, Rushi Vyas, Li Yang, Catherina Kruesi, and Manos M. Tentzeris ,” Low Cost Inkjet-printing Paper-Based Modules for RFID Sensing and Wireless Applications”, Proceedings of the 38th European Microwave Conference, October 2008, Amsterdam, The Netherlands
- [8]Rushi Vyas, Amin Rida, Li Yang and Manos M. Tentzeris, “Design and Development of a Novel Paper-based Inkjet-Printed RFID-Enabled UHF (433.9 MHz) Sensor Node”, Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, 2007
- [9] Li Yang and Manos M. Tentzeris, “Design and Characterization of Novel Paper-based Inkjet-Printed RFID and Microwave Structures for Telecommunication and Sensing Applications”, 2007 IEEE-IMS Symposium, pp.1633-1636, Honolulu, HI, June 2007.
- [10]<http://www.ceradrop.fr/>
- [11]Thèse Fanfan HE, “Innovative microwave and millimetre-wave components and sub-systems based on substrate integration technology”, Département de génie électrique école polytechnique de Montréal, MARS 2011.
- [12]A. Khalil, D. Passerieux, D. Baillargeat, N. Delhote, S. Verdeyme, L.Rigaudeau, & J. Puech, “Quasi-elliptic 150 GHz highly selective LTCC filter” IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Anaheim USA, Mai 2010
- [13]A. LAMMINEN, J. SÄILY & A. VIMPARI “Design and processing of 60 GHz antennas on low temperature co-fired ceramic (LTCC) substrates”, 7th MINT Millimeter-Wave Inter. Symposium-MINT-MIS, 2006

Chapitre III: Filtre Hyperfréquences multi- matériaux

I. Introduction

Les filtres hyperfréquences sont des composants très importants dans une chaîne de transmission-réception qui jouent un rôle essentiel dans les systèmes de télécommunication modernes. Ils sont intégrés dans de nombreuses applications puisqu'ils permettent de limiter la perturbation d'un système par rapport à un autre. Pour satisfaire une demande croissante de forte intégration, de diminution de l'encombrement..., il est nécessaire de développer des composants tels que les filtres microondes de plus en plus compacts. De plus, il n'est pas rare que ces contraintes de miniaturisation s'accompagnent de contraintes de filtrages sévères, comme dans le cas des filtres passe bande très sélectifs en fréquence à faibles pertes d'insertion.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la technologie jet d'encre est une technologie innovante qui permet d'imprimer des couches diélectriques et métalliques. Nous avons testé cette technologie en 2D par l'impression de différents motifs en argent puis nous avons démontré la possibilité d'impression multicouche mélangeant encres métalliques et diélectriques. Ce travail nous a permis de définir des règles de conception en particulier au niveau de l'impression des couches diélectriques où nous sommes limités à une faible épaisseur (quelques μm).

Après la réussite de l'impression de capacités MIM, nous avons pour objectif dans ce chapitre d'imprimer un filtre interdigité où nous viendrons rajouter un effet capacitif pour diminuer la taille de ce filtre. Ce dernier sera réalisé via plusieurs étapes technologiques qui seront présentées et détaillées dans ce chapitre. Ce filtre sera enfin comparé avec un filtre de référence pour prouver le gain en dimension, à performances équivalentes, qu'il peut apporter.

Après une présentation de la théorie générale de filtrage, nous nous concentrerons donc sur deux filtres:

- un filtre interdigité de référence
- un filtre interdigité multi-matériaux

L'ensemble du cycle de conception, de fabrication et de mesures sera présenté pour ces deux filtres.

II. La théorie de filtrage

Les filtres sont classés en deux grandes familles : numérique et analogique. Les filtres numériques sont réalisés à partir de structures intégrées microprogrammable (DSP, Digital signal processing). Ils fonctionnent en temps discret, avec l'objectif de modifier d'une façon précise le contenu fréquentiel d'une séquence appliquée à l'entrée du filtre [1].

Les filtres analogiques sont aussi classés en plusieurs catégories : actifs et passifs. Les filtres actifs sont capables d'effectuer en une même opération, le filtrage et l'amplification. Pendant les travaux de cette thèse, nous nous sommes seulement intéressés au filtrage passif qui se caractérise notamment par l'usage exclusif de composants passifs. Dans la suite de ce manuscrit, le mot « filtre » sera utilisé pour désigner un filtre passif.

Dans les domaines de l'électronique, il est très difficile de trouver un système qui ne contient pas au moins un filtre. Ce composant, quelle que soit sa topologie, peut éliminer des fréquences parasites indésirables et isoler un signal dans une bande de fréquence déjà spécifiée. Par contre, les performances d'un filtre sont évaluées par des caractéristiques électriques d'un côté (sélectivité, niveau de pertes, atténuation minimale, ondulation, isolation entre bandes et canaux...), et par des caractéristiques physiques (volume, surface occupée,...) et contraintes environnementales (sensibilités aux contraintes thermiques par exemple) de l'autre côté.

D'un point de vue historique, plusieurs approches pour développer un filtre microonde sont rapportées par R. Levy [2]. Le filtre à cavités couplées, le filtre à câble coaxial, le filtre à résonateurs diélectriques, le filtre à ligne microruban sont des exemples parmi beaucoup d'autres.

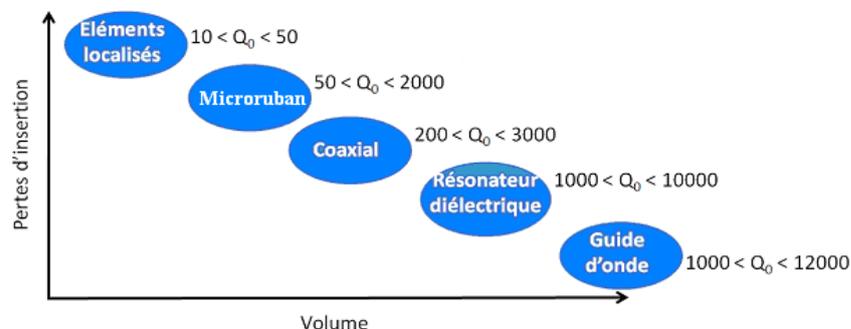


Figure III- 1: Caractéristiques de plusieurs types de résonateurs à 5 GHz [3]

Sur la Figure III- 1, sont représentés les tailles, les facteurs de qualité à vide et les pertes d'insertion relatives de plusieurs types de résonateurs [4]. On observe qu'à fréquence

de résonance donnée, une cavité résonante remplie d'air possède le facteur de qualité à vide le plus élevé mais avec un encombrement le plus important, contrairement aux résonateurs à éléments localisés ou planaires qui présentent un faible encombrement mais également de faibles facteurs de qualités à vide. Un des objectifs de ce travail est de trouver un compromis entre la taille et la valeur du facteur de qualité à vide nécessaire pour satisfaire les spécifications de filtrage.

III. Filtres interdigités

III.1. Un peu d'histoire

A la suite de ses travaux sur les filtres à résonateurs $\lambda/2$ couplés parallèlement, G.L. Matthaei a développé en 1962 la méthode de conception des filtres interdigités [5]. La théorie exacte sur la synthèse de ces filtres a été fournie par R.J. Wenzel en 1965 [6]. Ces filtres interdigités sont constitués de conducteurs parallèles disposés transversalement entre deux plans de masse (Figure III- 2).

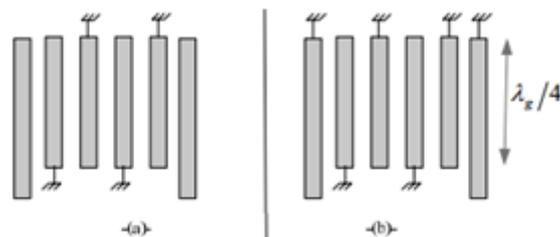


Figure III- 2 :a- Accès en circuit ouvert -b -Accès en court-circuit

Chacun des conducteurs possède une extrémité reliée à un plan de masse et l'autre extrémité non connectée. Les résonateurs ont la même longueur ($l = \lambda_g/4$). Concernant la configuration des accès, deux possibilités se présentent : dans la première (figure 2-a), les accès sont en circuit ouvert et ils sont pris en compte dans le nombre des résonateurs, ce qui n'est pas le cas de la deuxième configuration (figure 2-b) où les accès sont court-circuités. Les filtres interdigités présentent l'avantage d'être compacts et faciles à fabriquer. Les gaps relativement importants (quelque centaine de μm) entre les résonateurs rendent la structure peu sensible aux tolérances de fabrication.

Par ailleurs, ces filtres peuvent être accordés en fréquence en insérant des capacités variables associés aux résonateurs. Cependant ils présentent des pertes d'insertion importantes

surtout dans les applications à bande étroite, et des facteurs de qualité à vide Q_0 plus faibles que pour un résonateur n'en possédant pas.

Une variante du filtre interdigité chargé capacitivement est le filtre combline, développé par G.L. Matthaei en 1963 [5]. Ce filtre est composé de résonateurs métalliques parallèles placés transversalement, tous court-circuités d'un côté et chargés par une capacité variable de l'autre (Figure III- 3). Ceci permet d'avoir un filtre accordable en fréquence [7].

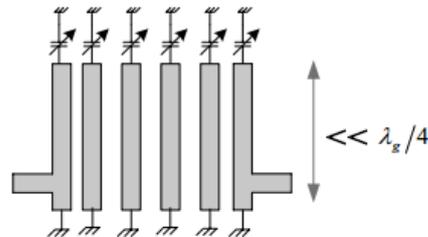


Figure III- 3 :Filtre combline

L'avantage de ce type de filtres est qu'il présente un encombrement réduit par rapport aux filtres interdigités puisque la taille des résonateurs est typiquement beaucoup plus petite que le quart de la longueur d'onde à la fréquence centrale.

On peut trouver dans la littérature [8] des exemples de structures jouant sur un rajout d'effet capacitif à l'extrémité de résonateurs microstrip (Figure III- 4). Ce type de structure est particulièrement recherché lorsque l'on souhaite diminuer la taille de chaque résonateur et donc du filtre.

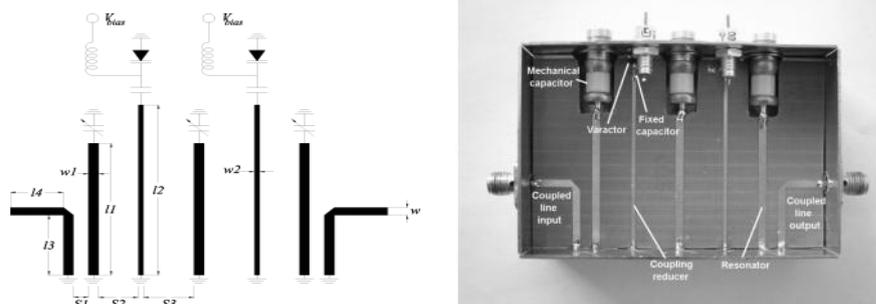


Figure III- 4 : Principe d'un filtre passe-bande microruban à effet combline [8]

III.2. Synthèse de filtres inter-digités

III.2.1. Fréquences de résonance

Les résonateurs utilisés sont des résonateurs en $\lambda/4$, ce qui signifie que leur longueur l_0 équivaut au quart de la longueur d'une onde se propageant dans le milieu considéré, de permittivité ϵ_r , à la fréquence f_0 ou encore :

$$l_0 = \frac{1}{4} \cdot \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{eq. 1})$$

avec c , la vitesse d'une onde électromagnétique dans le vide.

A noter que cette longueur ne dépend ni de l'impédance, ni de la structure réelle.

On utilise le formalisme d'une matrice dite "matrice de couplage" pour résumer les couplages présents dans le filtre entre résonateurs et leur fréquence propre. Le terme M_{ii} caractérise le décalage fréquentiel du résonateur, si un décalage M_{ii} est requis, la fréquence correspondante (qui remplace f_0 dans la formule précédente) vaut alors :

$$f = f_0 + M_{ii} \cdot \frac{B}{2} \quad (\text{eq. 2})$$

avec B bande réelle du filtre.

III.3. Couplage M et facteur de couplage k

Le « couplage » est défini comme terme normalisé (m_{ij}) ou dé-normalisé (M_{ij}) des matrices de couplage dans le cas de deux résonateurs couplés, c'est aussi le terme lié aux fréquences de résonance (f_1 et f_2) de lignes couplées, et quantifiable à l'aide de simulations EM. Il est également possible de définir le couplage en fonction des impédances associées aux modes pairs et impairs s'installant entre deux lignes couplées.

Pour plus de commodité, le couplage défini en fonction des impédances paires (Z_{oe}) et impaires (Z_{oo}) sera appelé facteur de couplage et noté k , par opposition aux couplages des matrices de couplage notés "m" si normalisés et "M" si défini précédemment.

Z_{oe} , l'impédance du mode pair, est l'impédance présentée par une ligne lorsque les excitations sont en phases pour les deux lignes. Z_{oo} est l'impédance présentée lorsque l'excitation est en opposition de phase. Dans ce contexte l'impédance caractéristique peut être définie par $Z = Z_{oe} \cdot Z_{oo}$

k vaut alors :

$$k = \frac{Z_{oe} - Z_{oo}}{Z_{oe} + Z_{oo}} \quad (\text{eq.3})$$

Il en découle plusieurs différences conceptuelles entre k et M :

- Le facteur de couplage k , contrairement à M , n'est pas lié aux longueurs des lignes en regard, uniquement aux impédances de leurs modes.
- Pour deux lignes distinctes, k ne dépend que des paramètres géométriques quantifiables dans une coupe transverse. Pas de changement du signe selon la disposition des masses, par exemple, comme c'est le cas pour M .
- k est défini et quantifiable quelles que soient les lignes y compris pour des lignes ne présentant pas de résonance ou ayant des fréquences de résonance différentes, ce qui permet par exemple d'exprimer la « pollution » ou le niveau de couplage parasite d'une ligne de transmission sur une autre (ou leur isolation). L'utilisation de M ne concerne que les éléments résonants.

III.4. Impacts des divers éléments constitutifs d'un filtre inter-digité

III.4.1. Pieds de barreau

On appelle pied de barreau le décalage introduit entre 2 barreaux afin que l'extrémité de l'un n'empiète pas sur la masse de l'autre. Ce décalage a pour effet une diminution de la longueur couplée et donc du couplage.

III.4.2. Vias

L'utilisation de vias, nécessaires dans la plupart des cas pour la connexion à la masse d'une extrémité de chaque résonateur, induit une modification de la fréquence de résonance. Si la modification est difficile à quantifier à l'aide de modèles analytiques simples, les vias peuvent néanmoins être vus comme des self-inductances supplémentaires qui « augmentent » la longueur équivalente de la ligne dont ils sont la terminaison. La raison de cette complexité tient également au fait que les vias ne sont pas forcément directement raccordés aux doigts : Ci-dessous plusieurs configurations possibles pour limiter la sensibilité de la structure à la position des vias :

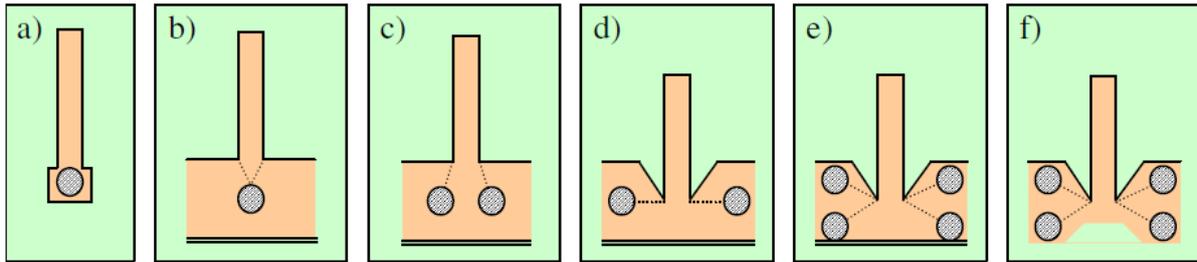


Figure III- 5 Différentes configurations de vias pour des $\frac{1}{4}$ d'onde. Les doubles barres indiquent la présence d'une 2^e rangée de vias [11].

La configuration a) correspond à celle obtenue à l'issue de la plupart des processus de synthèse de filtres inter-digités : la masse au plus près de l'extrémité du barreau. C'est une configuration simple mais aussi très dispersive. La configuration b) introduit un plan de masse : c'est la solution la plus utilisée afin de réduire les effets de dispersion. La configuration c), du fait de ses 2 vias, et donc de la réduction de la self-inductance équivalente, permet de limiter encore l'impact des dispersions. Cette solution est généralement trop encombrante pour les inter-digités plans mais est tout à fait adaptée aux inter-digités superposés. Les configurations d), e), et f) sont des configurations étudiées pour diminuer la self équivalente et la répartir au mieux sur l'extrémité du barreau : lorsque les vias sont décalés lors de la fabrication, une compensation s'effectue. Ces configurations sont aussi efficaces qu'elles sont complexes. De plus, elles impliquent une diminution des longueurs de barreaux en regard et donc une diminution du couplage maximum possible. De fait, elles ne peuvent être utilisées que lors de conceptions manuelles.

Suivant le type de configuration et les dimensions choisies l'allongement équivalent résultant n'est pas le même. C'est pourquoi lors de la synthèse, des petites corrections peuvent s'avérer nécessaires afin de corriger le décalage introduit par un plan de masse par exemple.

La thèse d'Aurélien Perigaud [9] a permis de développer une méthode de conception intégrant ces différents types de résonateurs $\lambda/4$ reliées à la masse par via traversant. Les méthodes développées, aujourd'hui intégrées dans les outils de conception utilisés dans le laboratoire XLIM, a permis la conception des filtres interdigités présentés dans les paragraphes suivants. Plus de détails sur ces techniques de conception sont accessibles dans la thèse en question [9].

III.5. Filtre interdigité de référence:

Le point de départ de cette proposition vient des avancées précédentes, présentées dans le chapitre II, permettant de déposer d'une manière localisée des couches métalliques (encre à base de nanoparticules d'argent) ou diélectrique (encre basée sur le matériau LTCC Heraeus 51K65).

Les tests précédents ont de plus validé la possibilité de réaliser des capacités de type MIM reposant sur l'empilement des couches suivantes : couche d'argent sur $5\mu\text{m}$, couche de diélectrique sur $20\mu\text{m}$, couche d'argent sur $5\mu\text{m}$.

L'intérêt de ce type de capacité localisée dans la réalisation d'un résonateur vient du fait que, rajoutée à l'extrémité d'un résonateur planaire, cette dernière doit permettre de venir diminuer sa taille pour une fréquence similaire à la manière des résonateur combline [8]. Le choix d'un résonateur planaire s'est quant à lui fait pour rester cohérent avec les développements technologiques réalisés jusqu'à présent.

L'idée proposée ici est donc de viser la réduction de la taille d'un filtre classique, le choix se porte sur un filtre interdigité (ID). Cependant nous avons souhaité aller encore plus loin et essayer de rendre plus compact un filtre planaire déjà connu pour sa compacité. Avec la technologie jet d'encre, les capacités MIM viennent remplacer des éléments localisés éléments accordables utilisés classiquement [8], ces capacités étant reliées à la masse par des vias métallisés.

Ces types de filtre planaire consistent en l'association par proximité de plusieurs résonateurs $\lambda_g/4$ comme dans les paragraphes précédents. Cette configuration nous permet d'avoir des forts couplages entre résonateurs ce qui donne la possibilité d'avoir une large bande passante avec une topologie planaire et surtout cette configuration est compatible avec l'impression jet d'encre pour la fabrication de cette structure.

Les spécifications d'un filtre sont généralement données à partir d'un gabarit. Ce dernier renseigne sur le type du filtre et les caractéristiques électriques auxquelles il doit répondre (fréquence centrale f_0 , bande passante Δf , niveau de réjection dans les bandes atténuées, niveau des pertes d'insertion, la platitude dans la bande). Le gabarit présente des zones d'exclusion en fonction de la fréquence (Figure III- 6). L'objectif est donc de concevoir le filtre dont la réponse entre dans le gabarit [7].

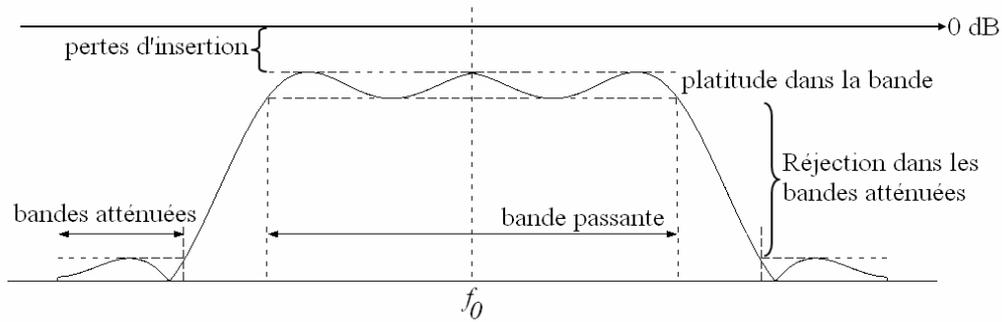


Figure III- 6 : Caractéristiques électriques d'un filtre passe-bande

Ces différents éléments rassemblés, la proposition présente s'est donc arrêtée sur un filtre interdigité typique présentant le gabarit suivant :

- fréquence centrale : 800 MHz
- bande passante équi-ondulation : 250 MHz (31%)
- Pertes d'insertion typiques recherchées < 1,5 à 2dB
- Ondulation dans la bande < 2 dB
- Topologie : Tchebychev 7 pôles

Afin de servir de référence, un filtre interdigité basé sur des résonateurs microruban $\lambda_g/4$ standards a été conçu. Ce dernier est visible sur la Figure III- 7 suivante. Ce filtre a été conçu sur un substrat d'Alumine standard ($\epsilon_r=9,8$, $\tan \delta = 0,0005$, épaisseur = 750 μm) sur lequel seront imprimés des résonateurs microruban en argent (conductivité = 20 S/ μm , épaisseur = 5 μm).

Ce filtre présente les dimensions hors-tout suivantes : 40,5 mm x 14,15 mm x 0,69 mm, soit une surface occupée de 573 mm². Des accès microruban sont proposés ici uniquement dans un but de mesure.

Les coefficients de couplage d'entrée/sortie et inter résonateurs ont été tout d'abord déterminés par une procédure d'identification des matrices de couplages objectives. Les paramètres géométriques (distances entre résonateurs en particulier) sont obtenus en suivant une procédure d'optimisation faisant appel à un modèle équivalent. Ce dernier permet de connaître le comportement fréquentiel du filtre en fonction de ses différents paramètres géométriques. Cette procédure a été mise au point par Aurélien Périgaud dans sa thèse [9] et a été appliquée de la même manière dans cette thèse. Le type de retour à la masse par via traversant retenu est la version intégrant un via au plus près de l'extrémité du résonateur. Ce choix a été principalement retenu car il maximise la compacité du filtre et permet simplement

de relier, via un plan métallique commun, les différentes extrémités des résonateurs pairs (respectivement impairs).

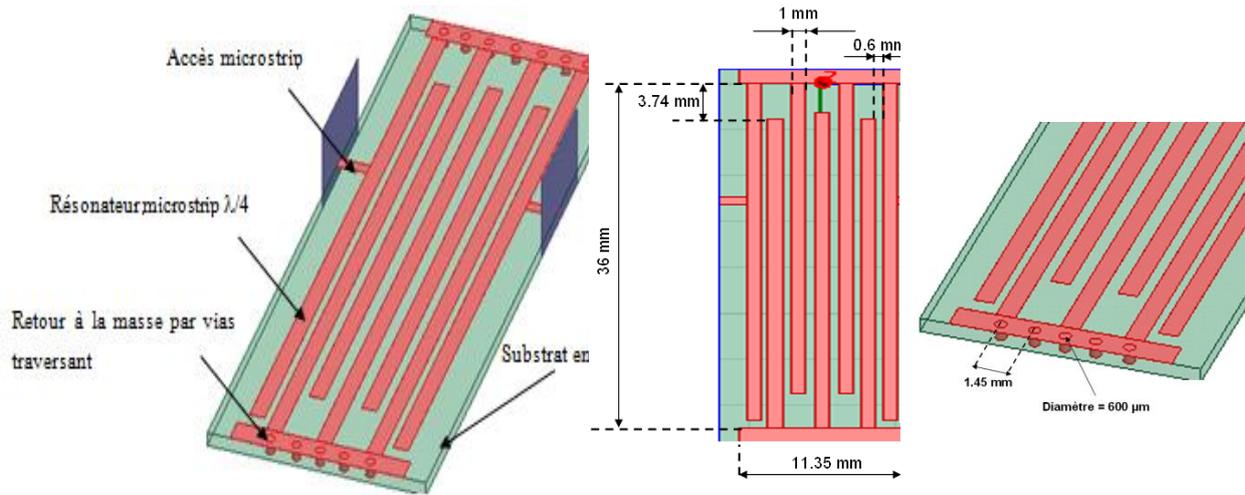


Figure III- 7 : Vue 3D du filtre interdigité de référence et dimensions principales

Après des simulations et optimisations sur logiciel HFSS, la Figure III- 8 présente les paramètres S obtenus :

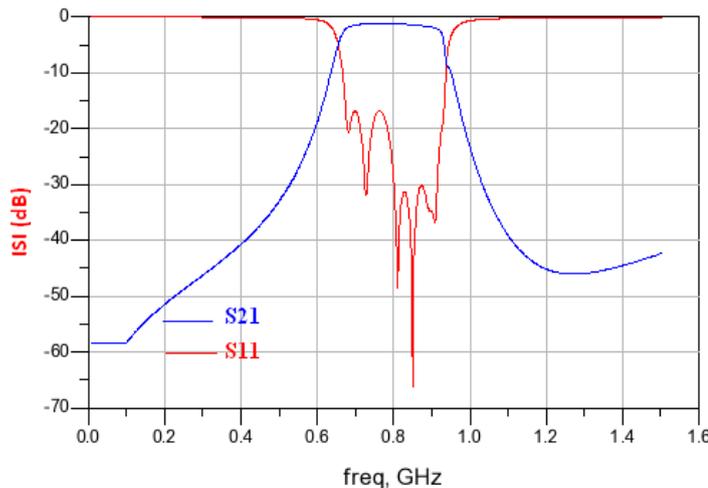


Figure III- 8: Réponse EM du filtre réalisé avec HFSS

Le filtre est centré à 800MHz avec une bande passante équi-ondulation de 250MHz, des pertes d'insertion de 1,2 dB avec une ondulation de 1,5 dB. Le coefficient de réflexion reste inférieur à -15 dB. Ce filtre comme pour tous les filtres planaires présente un faible facteur de qualité de l'ordre de quelques dizaines d'unités; il est pour notre cas égal à 100 à la fréquence centrale.

Ce filtre sera imprimé par la technologie jet d'encre pour répondre correctement aux performances souhaitées et servir de référence pour le filtre interdigité multi-matériaux.

Des études de sensibilité aux dimensions multicritères ont été menées pour connaître la dispersion de la réponse de ce filtre et sont proposées en annexe I.

III.6. Filtre interdigité multi-matériaux

La proposition faite dans ce chapitre consiste à rajouter à l'extrémité de chaque résonateur $\lambda_g/4$ une des capacités multicouches développées dans le chapitre précédent. La structure ainsi modifiée est présentée dans la Figure III- 9 suivante.

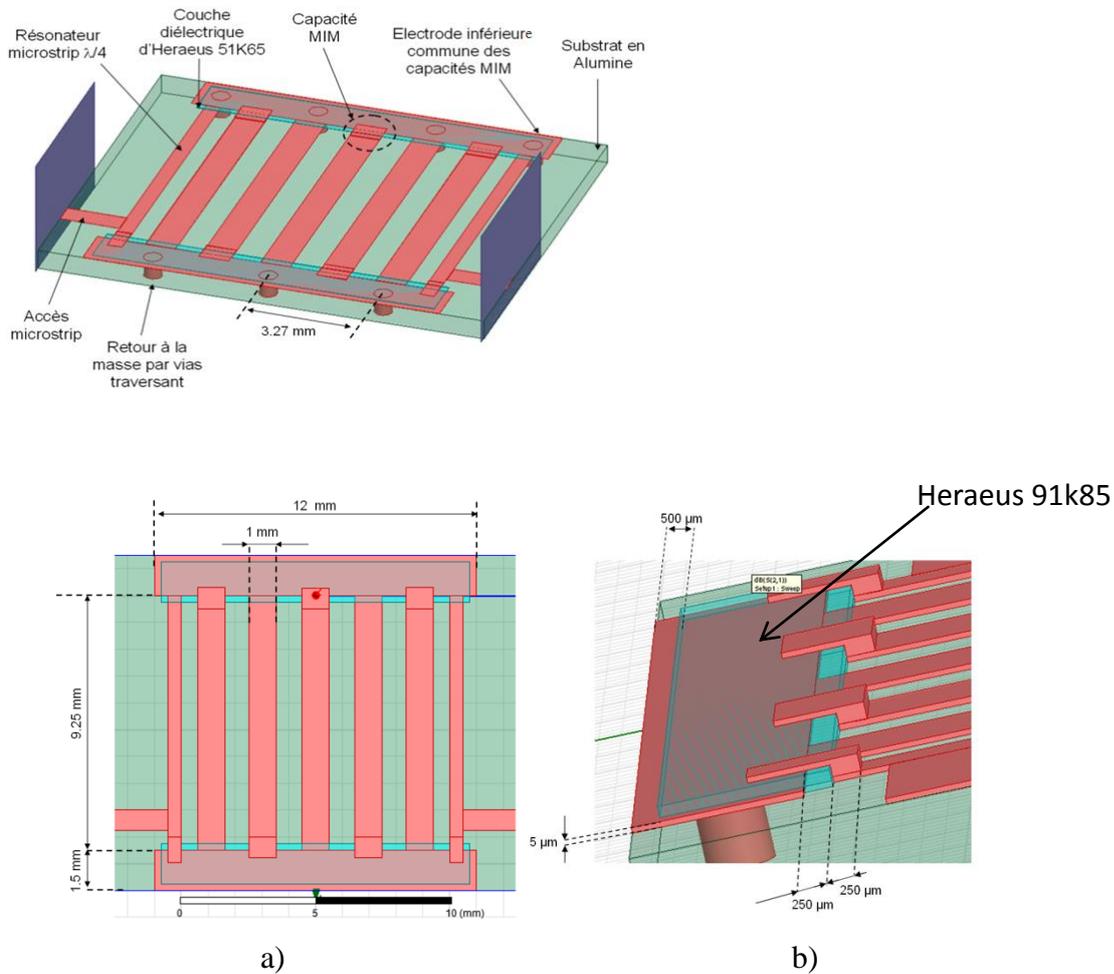


Figure III- 9: Vue 3D du filtre interdigité avec capacités et dimensions principales

Les capacités rajoutées sur chaque résonateur sont positionnées dans le prolongement de ces derniers. Ces capacités constituées d'un empilement métal-diélectrique-métal, reprennent les mêmes épaisseurs dans le chapitre précédent :

- électrode inférieure : 5 μm d'encre argent
- diélectrique : 20 μm d'encre Heraeus 51K65

- électrode supérieure : 5 μm d'encre argent

L'électrode inférieure est créée en reprenant, sur la structure de référence, le plan métallique qui sert de connexion à la masse par vias traversant. La couche de diélectrique, pour des raisons de plus grande facilité de dépôt, est déposée sous la forme d'une couche recouvrant quasiment tout le plan métallique servant d'électrode inférieure.

Quant à l'électrode supérieure, elle est localisée sous la forme de « crochets » (Figure III- 9, b) uniquement à l'extrémité non connectée à la masse des résonateurs $\lambda_g/4$.

Les réponses en paramètres S simulées (HFSS) sont présentées sur la Figure III- 10.

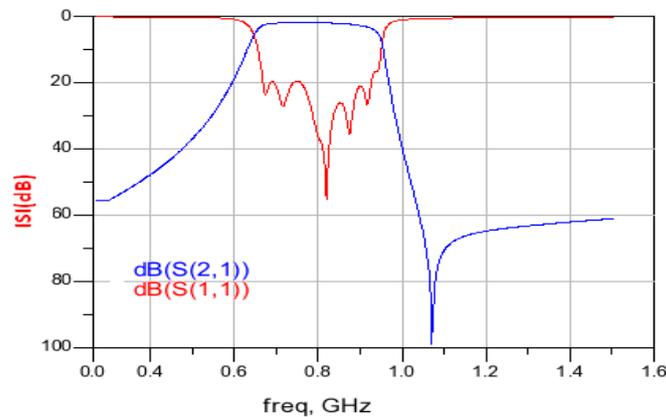


Figure III- 10 : paramètres S (HFSS) du filtre interdigité avec capacités

Le filtre est centré à 800MHz avec une bande passante équi-ondulation de 250MHz, des pertes d'insertion de 1,7dB avec une ondulation de 1,7 dB. Le coefficient de réflexion reste inférieur à -15 dB.

La légère augmentation des pertes d'insertion par rapport au filtre de référence vient principalement de la diminution du facteur qualité autour de 70 (100 pour les résonateurs de référence). Cette baisse du facteur de qualité est directement liée à la présence des capacités. Le filtre présente donc des performances très similaires au filtre de référence avec une surface occupée très faible (12,5 mm x 15 mm x 0,69 mm).

En effet, grâce à la capacité rajoutée en bout de résonateur, la taille de chacun d'eux passe d'environ 32 mm (structure de référence) à environ 9 mm, soit un gain de taille de 70%. Au-delà de sa compacité, ce filtre présente des avantages importants : un dépôt simultané des résonateurs métalliques et des capacités multicouches ce qui évite le besoin le report des capacités. Avec cette technologie le dépôt métallique et diélectrique est fait en une seule étape d'impression, et le nombre de vias diminue par rapport à celui de référence pour une réponse en fréquence similaire. Le filtre ID de référence nécessite la présence de plus de vias pour diminuer les couplages entre les résonateurs non adjacents (pairs ou impairs respectivement).

La configuration à capacités produit elle naturellement moins de ces couplages parasites et ne nécessite donc pas de renforcer l'isolation, entre résonateurs non adjacents.

De même que pour le précédent filtre, des études de sensibilité aux dimensions multicritères ont été menées pour connaître la dispersion de la réponse de ce deuxième filtre et sont proposées en annexe I.

III.7. Comparaison entre les différents filtres simulés :

En termes de ratio performance/taille, la version à effet capacitif présente donc un intérêt évident par rapport au filtre interdigité standard. Etant donné le caractère compact de cette solution technologique, la comparaison avec le procédé LTCC se pose naturellement.

Pour cela nous avons comparé la solution en technologie jet d'encre à ce que l'on pourrait obtenir en utilisant un procédé LTCC standard présenté dans la Figure III- 11 [10]. Nous avons ainsi simulé les performances d'un filtre équivalent qui serait réalisé à l'aide de bandes de Ferro A6M ($\epsilon_r = 5,9$; $\tan \delta = 1,2 \cdot 10^{-3}$) utilisant une métallisation à l'or ($\sigma = 13$ S/ μm).

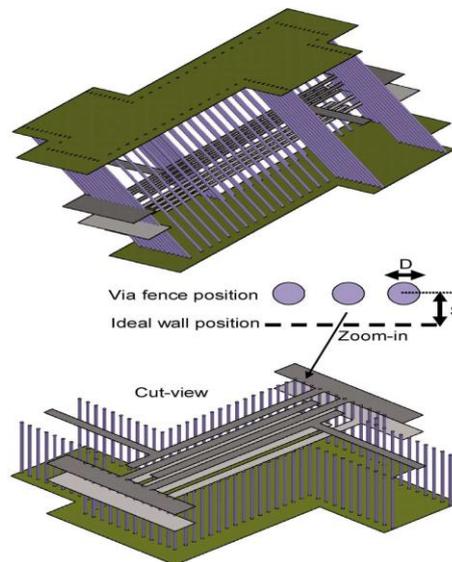


Figure III- 11 : Filtre LTCC présentant les mêmes performances du filtre jet d'encre

Basé sur une configuration compacte à base de résonateurs stripline $\lambda/4$, une telle structure nécessiterait d'empiler 9 couches de Ferro A6M d'épaisseur de 200 μm .

Les résonateurs ainsi conçus présenteraient un facteur de qualité de l'ordre de 70 à 1 GHz, soit la même valeur que les résonateurs fabriqués par jet d'encre avec capacité MIM à leur extrémité.

III.7.1. Comparaison entre filtre interdigité multicouche et filtre interdigité de référence

Le filtre avec capacités présente donc une surface de 187,5 mm² contre une surface pour le filtre de référence de 573 mm², soit une réduction de taille de 66%.

Au niveau des performances, la fréquence centrale et la bande passante sont similaires avec un gain de 70% au niveau de la surface (réduction de 2/3) pour la version multicouche, il y a moins de vias et moins de couplages parasites car les doigts sont plus courts. Le filtre à capacités présente néanmoins une plus grande sensibilité aux dispersions dimensionnelles surtout dans la zone avec effets capacitifs très sensibles. Le facteur de qualité à vide diminue de 30% avec un facteur de qualité à vide pour le filtre multicouche de 70 contre 100 pour celui de référence.

III.7.2. Comparaison entre filtre interdigité multicouche et filtre interdigité en LTCC

Le Tableau III- 1 résume et compare les caractéristiques principales des trois filtres considérés :

	F ₀ (MHz)	Δf(MHz)	Q ₀	Perte d'insertion (dB)	Taille en mm (X Y Z)	Surface occupée (mm ²)
Filtre interdigité de référence	800	250	100	1,2	40,5 x 14,15 x 0,78	573
Filtre interdigité multicouche	800	250	70	1,7	12,5 x 15 x 0,78	187,5
Filtre LTCC	800	250	70	1,3	23,2 x 10,65 x 1,8	247

Tableau III- 1 : comparatif des caractéristiques principales des filtres considérés

Le filtre interdigité multicouche présente un gain en surface de 25 % par rapport à celui utilisant la technologie LTCC pour des performances similaires ($P_{ins}= 1,7$ dB pour le filtre multicouche, $P_{ins}= 1,3$ dB pour le filtre LTCC). Le facteur de qualité à vide pour les deux filtres est le même (70), le filtre LTCC étant deux fois plus épais. Le coût de fabrication attendu pour les filtres imprimés est a priori bien moindre que ce que demanderait la production de filtres LTCC.

La fabrication de ce type de filtre à capacités imprimés avec la technologie jet d'encre nécessite de percer les vias et de les métalliser. Un essai de cette fabrication, présenté dans

l'annexe II, montre que la métallisation par dépôt auto-catalytique ne supporte pas la température de cuisson nécessaire au frittage de l'encre céramique.

Deux solutions à ce problème ont été envisagées :

- Métallisation des vias après l'impression jet d'encre,
- Remplacer les vias par des murs métalliques.

La première solution est identifiée comme risquée. Elle nécessite en effet de protéger les couches imprimés dans les bains d'électroless et d'électrolyse. Des essais précédents ont montré une faible protection des couches imprimés lors des bains, ces derniers ayant tendance à dégrader toute protection appliquée (scotch, résine).

Pour toutes ces raisons, nous avons opté pour la deuxième solution qui est présentée dans la partie suivante.

IV. Filtre interdigité sans via

IV.1. Filtre interdigité de référence :

La procédure de fabrication précédente (annexe II) s'étant montrée inexploitable, il est prévu de remplacer les vias par des murs métalliques. Ceci conduit à revoir la topologie du filtre de référence. Les résultats obtenu après optimisation est visible sur les Figure III- 12, Figure III- 13.

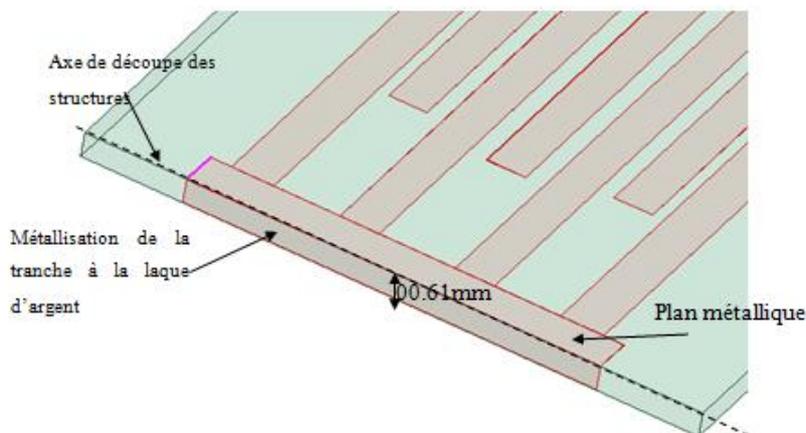


Figure III- 12: Mise à la masse par la tranche du substrat

Chapitre III- Filtre Hyperfréquences multi-matériaux

Ce filtre présente les dimensions hors-tout suivantes : 42 mm x 15 mm x 1 mm, soit une surface occupée de 630 mm². Des accès microruban sont proposés ici uniquement dans un but de mesure aisé à l'aide d'une cellule de mesure microruban (Wiltron) simple de mise en place.

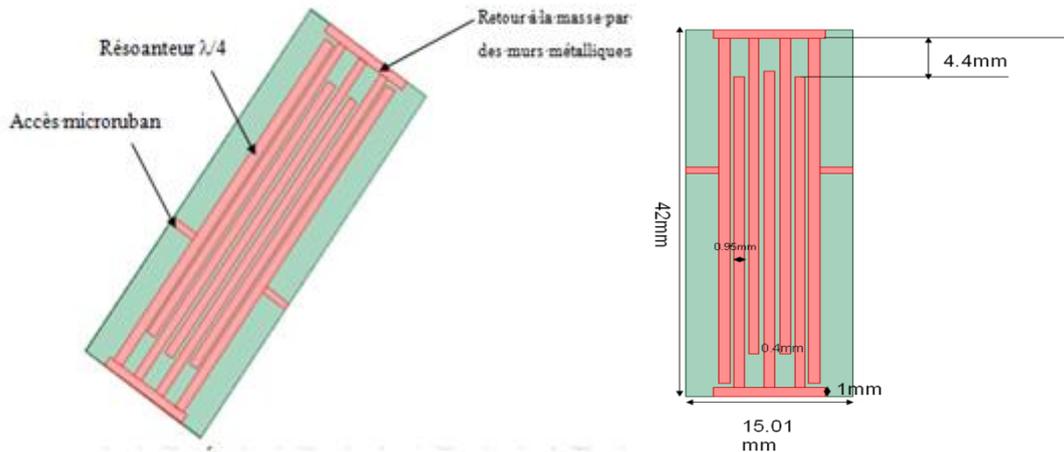


Figure III- 13 : Filtre de référence avec murs métalliques

Après optimisation sur le logiciel HFSS, la Figure III- 14 présente les paramètres S obtenus :

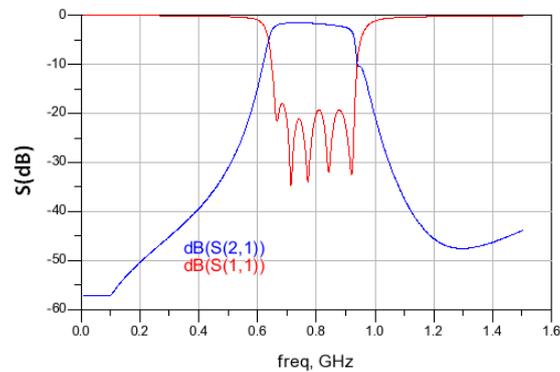


Figure III- 14 : Réponse EM du filtre simulé sous HFSS

Ce filtre est centré à 800MHz avec une bande passante équi-ondulation de 250MHz. Des pertes d'insertion de 1,2dB avec une ondulation de 1,7 dB sont observées dans la Figure III- 14. Le coefficient de réflexion reste inférieur à -15 dB, et comme pour le filtre de référence avec vias précédent, il présente un facteur de qualité à vide $Q_0 = 100$ à la fréquence centrale.

Ainsi, afin de ne pas avoir besoin de recourir à la mise en place de vias, il a été choisi à procéder comme suit pour la mise à la masse des résonateurs:

- Impression des résonateurs (face supérieure du substrat) et du plan de masse (face inférieure)
- Découpe des substrats au niveau du plan métallique reliant électriquement les résonateurs
- Métallisation de la tranche du substrat pour relier le plan métallique (face supérieure) au plan de masse

La métallisation de la tranche se fera manuellement à l'aide d'une laque à l'argent présentant une conductivité de $20 \text{ S}/\mu\text{m}$.

IV.2. Filtre interdigité multicouche :

Pour les filtres interdigités multicouches, nous avons de même remplacé les vias par des murs métalliques reliés à la main à l'aide d'une laque d'argent.

Le dessin final de cette structure avec des capacités multicouches localisées est visible sur la Figure III- 15.

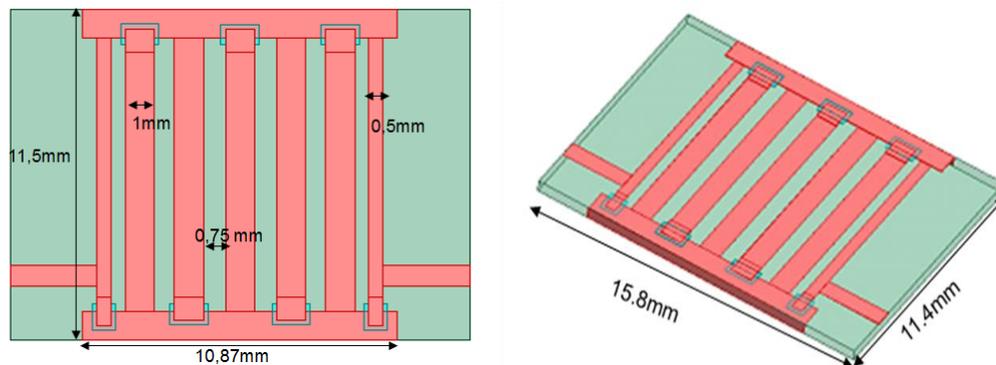


Figure III- 15 : Filtre interdigité multicouche avec murs métalliques

Après simulation sur le logiciel HFSS, la Figure III- 16 présente les paramètres S suivants :

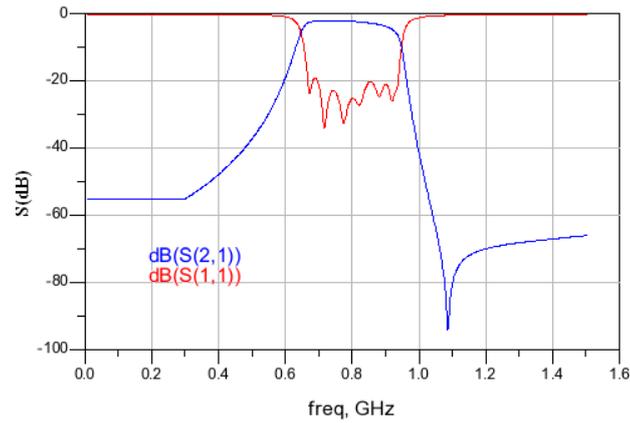


Figure III- 16 : Réponse EM du filtre simulé avec HFSS

L'évolution ainsi proposée permet de remplacer des vias métallisés, elle est donc retenue pour la phase suivante d'impression avec les caractéristiques suivantes : une fréquence centrale à 800MHz, une bande passante équi-ondulation de 250MHz, des pertes d'insertion de 1,7dB avec une ondulation de 1,7 dB, un coefficient de réflexion inférieur à -15 dB, et comme pour le filtre de référence avec vias précédent, présente un facteur de qualité à vide de $Q_0 = 70$ à la fréquence centrale.

IV.3. Comparaison entre les filtres avec vias et les filtres tronqués :

Les Tableau III- 2 et Tableau III- 3 résume les différences des performances entre les deux filtres avec les deux méthodes de fabrication :

	Dimensions (mm ²)	Fréquence centrale (MHz)	Q_0	Δf (MHz)	pertes d'insertion (dB)	ondulation (dB)	coef de réflexion (dB)
Filtre avec vias	36x11	800	100	250	1,2	1,5	-15
Filtre tronqué	42x15	800	100	250	1,2	1,7	-15

Tableau III- 2 : Comparaison des filtres interdigités de référence avec vias et tronqué

	Dimensions (mm ²)	Fréquence centrale (MHz)	Q_0	Δf (MHz)	pertes d'insertion (dB)	Ondulation (dB)	Coef de réflexion (dB)
Filtre avec vias	10,75X12	800	70	250	1,7	1,7	-15
Filtre tronqué	10,87X11,5	800	70	250	1,7	1,7	-15

Tableau III- 3 : Comparaison des filtres interdigités multicouches avec vias et tronqué

Cette comparaison nous a permis de valider cette solution, permettant ainsi de simplement contourner le problème des vias métallisés rencontrés précédemment. A noter que le filtre à capacités occupe, dans la version actualisée, 75% de surface en moins par rapport à la version du filtre de référence équivalent.

V. Validation expérimentale

Le premier test de fabrication du filtre interdigité de référence est présenté dans la Figure III- 17. Plusieurs filtres sont imprimés sur des substrats d'Alumine (5cm x 5cm x 0,75mm).

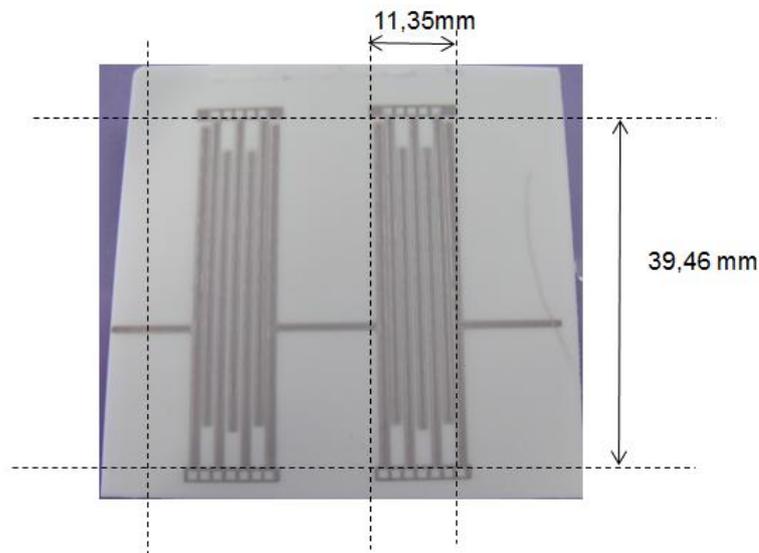


Figure III- 17 : Deux filtres de référence par substrat

Après impression jet d'encre, il faut découper chaque filtre à part pour effectuer la mesure par une cellule microruban (Wiltron).

Après la découpe, la laque d'argent est appliquée sur la tranche afin de créer une connexion qui vient faire le retour à la masse nécessaire au résonateur $\lambda g/4$. Cette laque est aussi utilisée pour métalliser simplement le plan de masse (face opposée du substrat). Les démarches faites avant les mesures sont présentées dans la Figure III- 18 :

Chapitre III- Filtre Hyperfréquences multi-matériaux

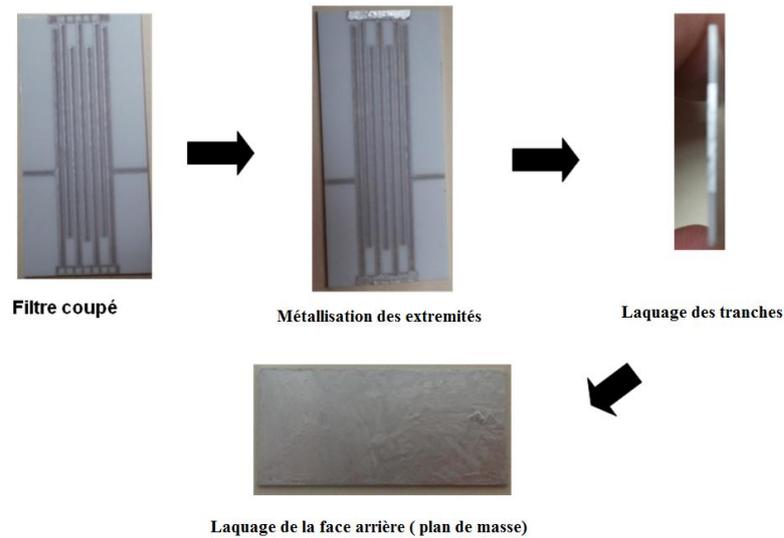


Figure III- 18 : Démarches avec la laque d'argent avant mesure

Avec la cellule de Wiltron (Figure III- 19), nous avons mesuré le premier essai de ces filtres de références. La réponse de ce filtre est présentée dans la Figure III- 20 :

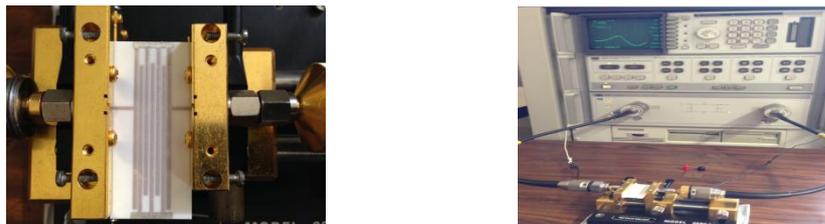


Figure III- 19: Mesure du filtre par la cellule Wiltron

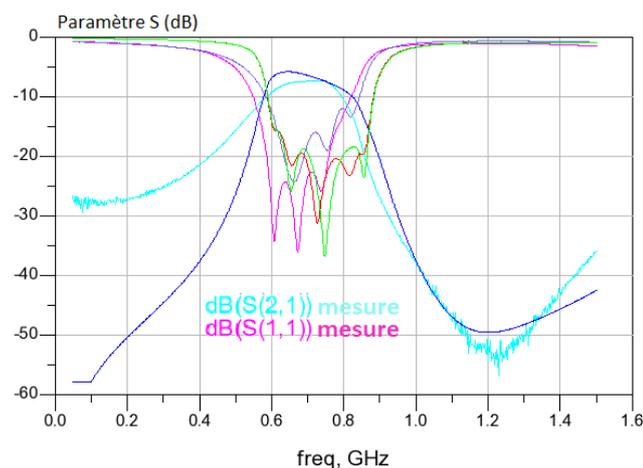


Figure III- 20: Mesures et rétro-simulations intégrant les dimensions du filtre réalisé

La réponse observée montre une forte dégradation des performances par rapport aux résultats attendus. Une vérification des dimensions imprimées montrent des écarts jusqu'à $80\mu\text{m}$ en moyenne entre design et mesure. L'adaptation dans la bande passante du filtre est bonne (< -10 dB). Le filtre est cependant très décalé en fréquence autour de 700 MHz au lieu

Chapitre III- Filtre Hyperfréquences multi-matériaux

des 800 MHz attendus. Les pertes d'insertions sont très élevées en mesure (-7dB). Il a fallu descendre la conductivité des résonateurs en rétro-simulation jusqu'à 0,5 S/ μm pour retrouver ce niveau de pertes.

Une observation fine de la découpe du filtre montre que le flanc de ceux-ci sont non parfaitement droits et provoquent une mauvaise accroche des mâchoires du système de mesure. Des pertes estimées de l'ordre de 1dB sont ramenées par ce dernier.

Le reste des pertes est vraisemblablement dû à une mauvaise conductivité globale au niveau des résonateurs. Difficile de différencier si la rugosité élevée (supérieur à 2 μm par endroit) ou la conductivité des résonateurs est moins bonne (aspect de la métallisation différent de l'impression préliminaire des motifs carrés).

Les deux réponses en fréquence (simulation intégrant les dimensions réelles et mesure, Figure III- 20) de filtre de référence sept pôles montrent des résultats assez loin de ceux attendus. Nous voyons que la différence entre les dimensions optimisées et celles fabriquées impose un changement dans le comportement du filtre au niveau des couplages entre les résonateurs et sont à l'origine de la réponse mesurée. Ces dimensions ont été introduites sous HFSS afin de confirmer que celles-ci sont à l'origine du comportement observé.

Le Tableau III- 4 contient les caractéristiques électriques extraites des réponses expérimentales.

	Fréquence centrale (MHz)	Δf (MHz)	pertes d'insertion (dB)	Coef de réflexion (dB)
Valeurs théoriques	722	246	6,8	<-10
Valeurs mesurées	728	219	7,3	<-10

Tableau III- 4: Caractéristiques expérimentales électriques

Le profil des résonateurs a été mesuré et a montré une épaisseur entre 8 et 10 μm avec une rugosité de surface de l'ordre de 2 μm . Les lignes sont plus épaisses qu'attendues (5 μm) et présentent une forme arrondie assez prononcée (Figure III- 21).

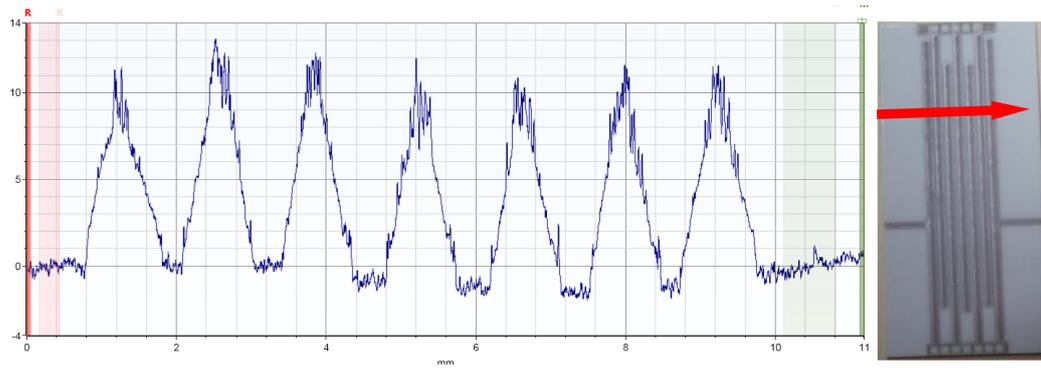


Figure III- 21 : Relevé du profil des 7 résonateurs du filtre de référence de la première fabrication

Etant donnée la fréquence de fonctionnement du filtre (800MHz) et la profondeur de peau associée ($>2\mu\text{m}$), le profil de résonateur très peu homogène en épaisseur doit contribuer fortement à l'augmentation des pertes du filtre sachant qu'il est difficile de différencier si cela est dû à la rugosité élevée (supérieure à $2\mu\text{m}$ par endroit) ou à la moins bonne conductivité des résonateurs. A noter qu'une observation rapprochée de la découpe du filtre montre que le flanc de ceux-ci sont non parfaitement droits et provoquent une mauvaise accroche des mâchoires du système de mesure. Des pertes estimées de l'ordre de 1dB sont ramenées par ce dernier. Pour ce premier test de fabrication, deux voies d'amélioration sont nécessaires : meilleure prise en compte du retrait de l'encre à la cuisson, définition d'une nouvelle stratégie d'impression pour se rapprocher des performances obtenues dans le chapitre 2.

V.1. Fabrication finale

Une deuxième fabrication est mise en œuvre en :

- tenant compte des dimensions mesurées sur le filtre de la première version afin de mieux évaluer les retraits subis par le filtre lors de sa cuisson.
- appliquant une stratégie d'impression se rapprochant d'une déjà éprouvée et garantissant un état de surface moins rugueux (positionnement des gouttes de $60\mu\text{m}$ de diamètre de l'encre argent, ...) et permettant de retrouver les performances obtenues à la fin du chapitre 2.

Ce filtre ainsi fabriqué présente un aspect visuel plus homogène que celui de la première fabrication. Un relevé du profil des résonateurs (Figure III- 22) confirme une plus grande régularité des dépôts avec une épaisseur autour de $7\mu\text{m}$ et une rugosité de $2\mu\text{m}$ environ et un profil moins « pyramidal » que les résonateurs de la première version. A noter que les gouttes d'argent présentent un diamètre en crue de $60\mu\text{m}$ et sont espacées en moyenne de $47\mu\text{m}$ lors de l'impression (maillage carré x-y).

Une observation des résonateurs imprimés est alors menée pour expliquer cela.

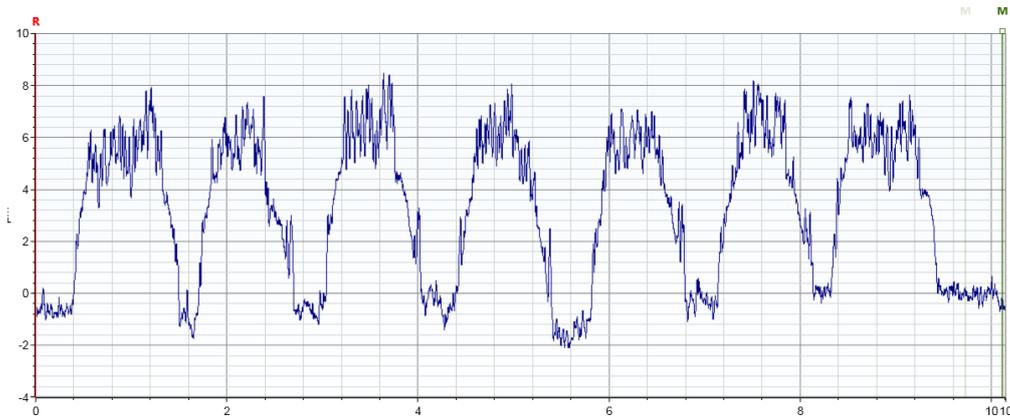


Figure III- 22 : relevé du profil des 7 résonateurs

Les filtres imprimés sont cette fois-ci mieux centrés (720 MHz pour 800 MHz attendu). Leur bande passante est de 250 MHz comme attendu. Les pertes d'insertion pour le meilleur filtre sont de 3,2 dB avec une adaptation de 16dB dans la bande. L'ondulation dans la bande est assez élevée autour de 3 dB (moins de 2dB attendu).

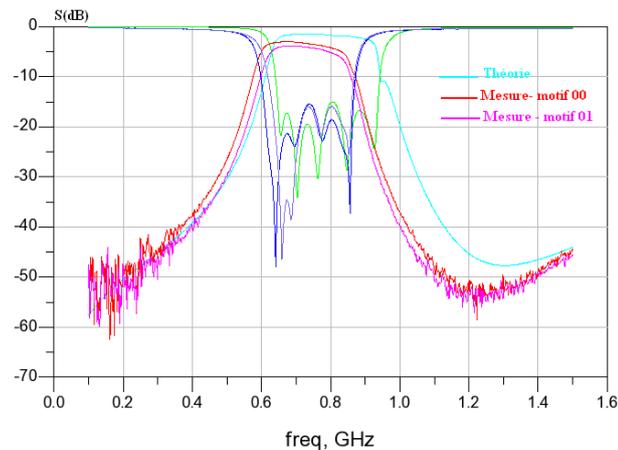


Figure III- 23 : Paramètres S mesurés et simulés du filtre de référence

Afin de rétro-simuler les filtres, différents relevés de dimensions ont été effectués :

- les résonateurs imprimés ont, en moyenne, une largeur de seulement 15 μ m supérieure à la valeur attendue
- observation identique pour la longueur des résonateurs
- les gaps entre résonateurs ne sont eux inférieures que de 20 μ m (en moyenne) à la valeur attendue.

Cette réalisation est donc très supérieure à la version précédente avec des cotes tenues plus fidèlement. Incorporées dans HFFS pour effectuer une rétro-simulation, ces dimensions permettent de retrouver très proprement les paramètres S mesurés (Figure III- 24).

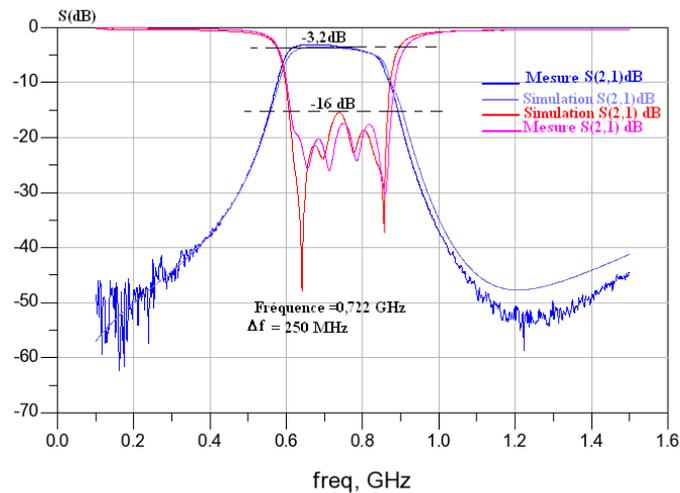


Figure III- 24 : Paramètres S mesurés et rétro-simulés du filtre de référence

Seule la conductivité globale des parties métalliques a été diminuée à une valeur équivalente autour de 12 S/ μm , cette valeur permettant de tenir compte de la rugosité de surface des résonateurs relativement élevée pour la longueur d'onde. L'amélioration des pertes de ce filtre passera ainsi par une amélioration de la rugosité des couches déposées.

V.2. Filtres multicouches et multimatériaux

Suite à cet essai très satisfaisant, le filtre à capacités a été réalisé par l'entreprise CERADROP (Figure III- 28). En tenant compte de tous les paramètres utilisés lors de la fabrication du filtre de référence (deuxième version), cette impression multimatériaux s'est faite en vérifiant tout particulièrement la taille des gouttes éjectées. En effet, la configuration des capacités amène 3 interactions différentes :

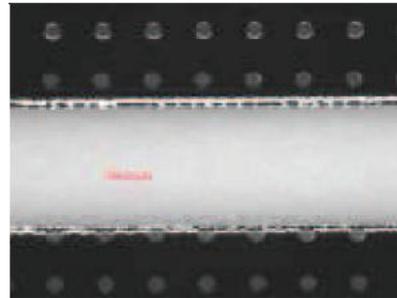
- Impression d'argent sur Alumine (électrode inférieure)
- Impression de céramique sur argent (couche diélectrique de la capacité)
- Impression d'argent sur encre céramique
- Et sur une zone faible, impression d'encre céramique sur Alumine.

Chapitre III- Filtre Hyperfréquences multi-matériaux

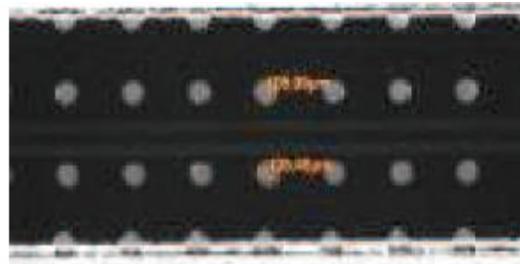
La Figure III- 25 montre les tests d'impression de ces 4 configurations. Chacun de ces essais montrent que les gouttes de matériaux prennent des diamètres différents : 60 μm pour l'argent sur l'Alumine, 105 μm pour l'encre céramique sur Alumine ou l'argent, 115 μm pour l'argent sur l'encre céramique.



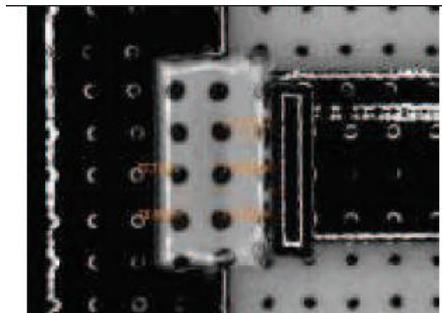
Etage 1 : Interaction métal sur substrat d'Alumine



Etage 1 : Interaction diélectrique sur substrat d'Alumine



Etage 2 : Interaction diélectrique sur métal



Etage 3 : Métal sur diélectrique

Figure III- 25 : Les interactions entre substrat et encres

Les Figures Figure III- 26 et Figure III- 27 montrent en particulier la zone des capacités avant et après frittage.

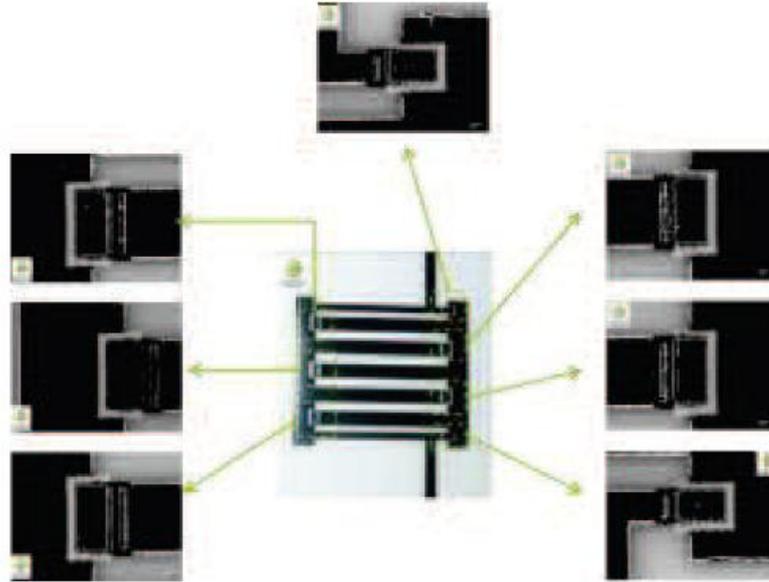


Figure III- 26 : Micrographies des filtres 3D après impression

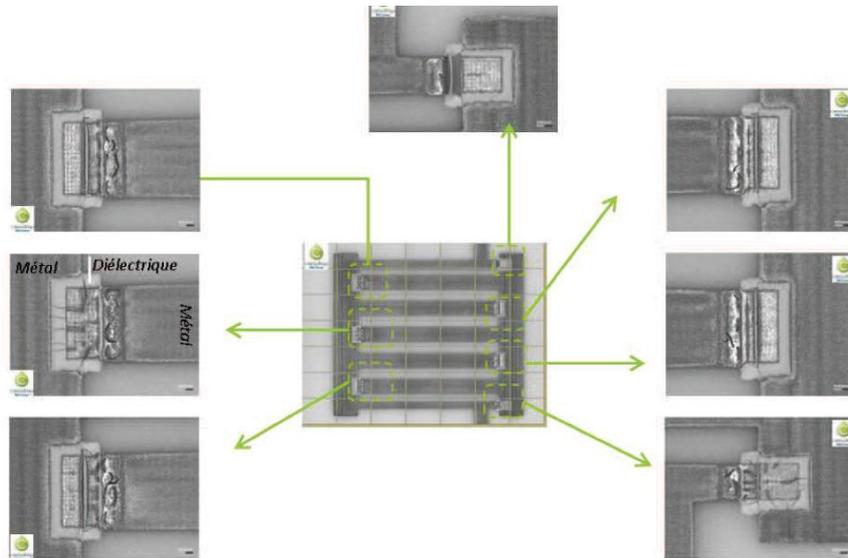


Figure III- 27 : Micrographies des filtres 3D après frittage à 900°C/3H

Cette étude s'est accompagnée d'une optimisation de l'écartement, de la vitesse de fabrication, de la fréquence d'éjection de chaque goutte à chaque étage de la capacité. Une épaisseur moyenne entre 3 et 4 μm avec une rugosité similaire aux essais précédents de l'ordre de 2 μm (Figure III- 29) sont observées.

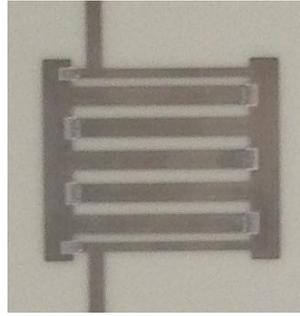


Figure III- 28: filtre à capacités par jet d'encre

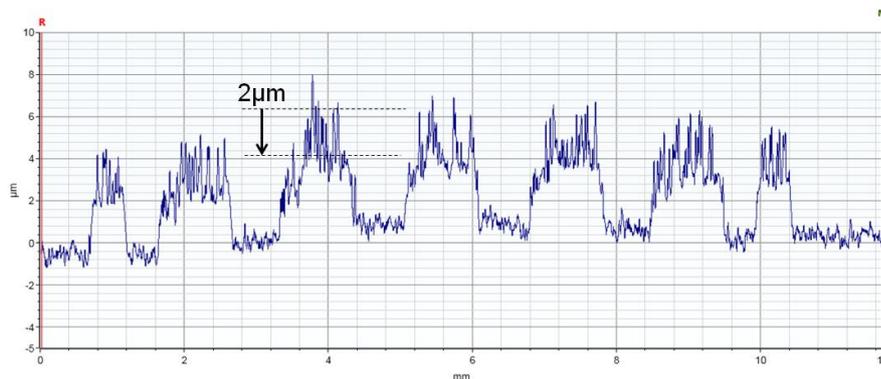


Figure III- 29: Relevé du profil des 7 résonateurs du filtre à capacités

Une observation rapprochée de ces capacités montrent de fortes déformations visiblement liées à une dilatation différentielle entre les différentes couches qui n'est pas encore suffisamment compensée. Les contraintes appliquées sans doute à la cuisson ont dans le pire des cas créées une fissure sur toute la hauteur des capacités, laissant même apparaître l'électrode inférieure des capacités. Cette déformation est très précisément positionnée sur la zone où l'extrémité des résonateurs monte sur la couche de diélectrique pour former l'électrode supérieure des capacités (Figure III- 30).

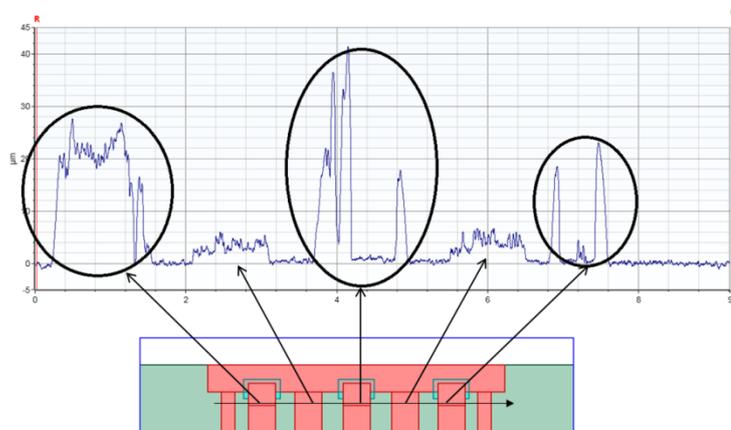


Figure III- 30: profil de la zone de départ des capacités

Malgré les efforts fournis par CERADROP, un travail supplémentaire sur la compensation des retraits sera nécessaire pour éviter ce phénomène. Les capacités sont

Chapitre III- Filtre Hyperfréquences multi-matériaux

visuellement très endommagées et leur fonctionnement s'en retrouvera très certainement compromis.

Les mesures en fréquence (Figure III- 31) sur les 4 filtres réalisés par CERADROP attestent malheureusement cet état de fait.

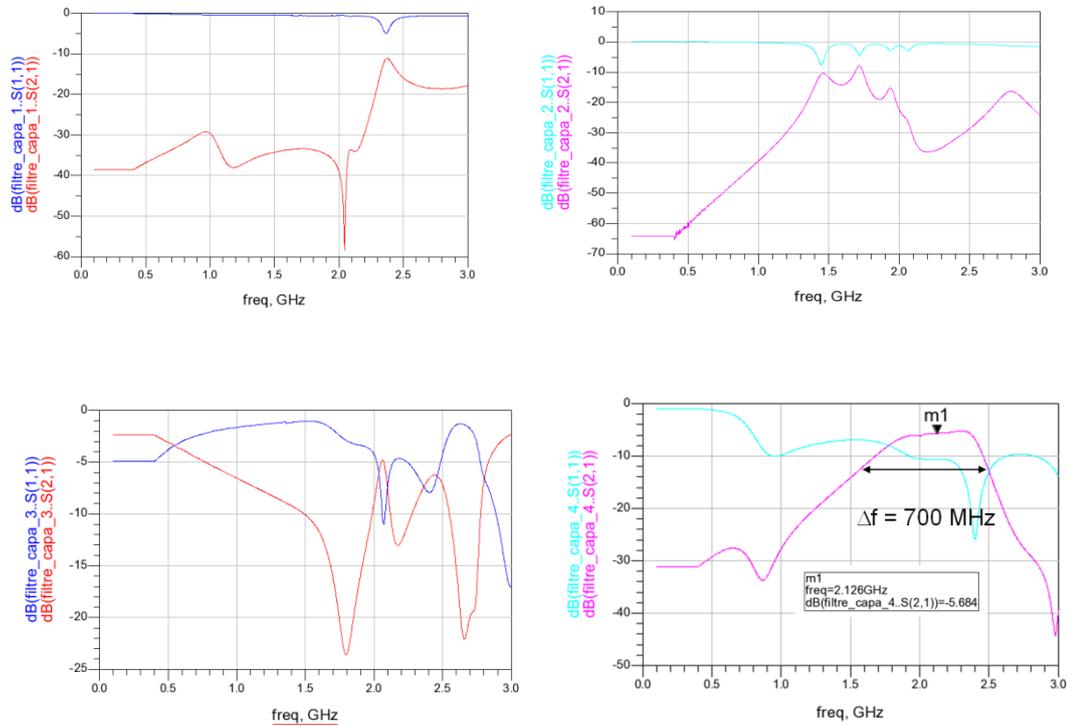


Figure III- 31: Mesure en fréquence des 4 filtres à capacités réalisés

Seuls les filtres n°2 et n°4 présentent une réponse ressemblante à celle d'un filtre passe-bande. Ces derniers sont centrés à des fréquences plus importantes qu'attendues (1,7 et 2,1 GHz respectivement) sans doute lié à des valeurs de capacité ramenées par ces éléments endommagés plus faibles que souhaitées.

VI. Conclusion

Pour valider les avantages de la technologie jet d'encre multicouche et surtout pour la comparer avec d'autres technologies multicouches comme celle du procédé LTCC, nous avons présenté dans ce chapitre deux types de filtre interdigité : un filtre de référence imprimé

Chapitre III- Filtre Hyperfréquences multi-matériaux

avec seulement de l'encre métallique, un filtre interdigité avec des capacités multicouches (argent, Hereaus, argent) imprimées à l'extrémité du résonateur. Ce dernier présente théoriquement une fréquence centrale autour de 800MHz, une bande passante de 250MHz, des pertes d'insertion de 1,7dB pour des dimensions de 10,87mm x11,5mm x 0,7mm.

L'aspect multicouche de cette technologie, pour les filtres interdigités, a permis une réduction de 66% de la surface du filtre par rapport au filtre interdigité de référence (dans leur version à tranche métallisée). A noter qu'une version équivalente réalisée en procédé LTCC occuperait deux fois plus de surface, serait deux fois plus épaisse et aurait des pertes de 1,3 dB pour une mi-bande passante autour de 800MHz.

Les mesures réalisées sur le premier essai du filtre de référence ont montrées des écarts entre dimensions obtenues et souhaitées assez importantes (jusqu'à 80µm en moyenne), une rugosité des couches imprimées assez importante (2µm) et un profil des lignes très arrondi. Le premier filtre présente des réponses assez éloignées de ce qui était attendu. Cet essai, nécessaire, a permis de mieux ajuster les retraits subis par le filtre imprimé après son séchage, de définir une stratégie de placement des gouttes optimisée et ainsi de garantir de bien meilleures performances pour la deuxième version.

Cette dernière présente en effet des caractéristiques très satisfaisantes :

- respect des dimensions à +/- 20µm au maximum
- profil des résonateurs plus net et régulier avec la même rugosité de 2µm
- fréquence centrale : 720 MHz
- bande passante : 250 MHz
- pertes d'insertions de 3,2 dB
- ondulation dans la bande de 3dB
- adaptation dans la bande passante : 16dB au pire

Le comportement expérimental a en particulier été très bien retrouvé en intégrant en simulation les dimensions réelles du filtre. Dans cette configuration imprimée avec l'encre métallique dopée et une rugosité de 2µm, avec un retour à la masse par la tranche (ce qui n'est pas idéal vis-à-vis d'une solution à base de vias traversant) et un plan de masse réalisé par laque à l'argent, on peut considérer une conductivité équivalente des parties métalliques de 12 S/µm environ.

L'impression des filtres à capacité s'est ainsi faite en intégrant des stratégies d'impression directement tirées de celle du filtre de référence première version qui ont donné

Chapitre III- Filtre Hyperfréquences multi-matériaux

satisfaction. Après une impression en crue s'avérant satisfaisante, l'étape de frittage a malheureusement fait apparaître une compensation des couches métalliques et diélectriques insuffisante. La conséquence a été la présence de dégradations physiques plus ou moins importantes au niveau de l'amorce des capacités. Dans les pires cas, des parties des capacités se sont même détachées rendant non concluant en l'état les résultats de mesure des filtres à capacités imprimées.

VII. Références chapitre III

-
- [1]L. SHUHUA, L. YUEPING AND W. SHUBIN, “Real-time audio signal acquisition system based on DSP and IIR filter realization and design”. Proceedings of International Symposium on Communications and Information Technology, ISCIT, Septembre 2009
- [2]R. LEVY AND S. B. COHN, “A history of microwave filter research, design and development”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.32, p. 1055-1067, Septembre 1984
- [3]R.R. MANSOUR, “Micro-machined and dielectric resonator tunable filters”, 39th European Microwave Conference Workshops, Rome, Italy, Septembre 2009
- [4]K.I. Konno, «Small Size Comblin Microstrip Narrow BPF», IEEE Microwave Theory and Techniques Symposium, pp. 917-920, 1992.
- [5]G.L.Matthaei, “Interdigital Band-Pass Filters,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.10, No.6, pp.479-491, November 1962.
- [6]R.J.Wenzel, “Exact Theory of Interdigital Band-Pass Filters and Related Coupled Band-Pass Structures,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.13, No.5, pp.559-575, September 1965.
- [7]Y. CLAVET, “Définition de solutions de filtrage planaires et multicouches pour les nouvelles générations de satellites de télécommunications” ,Thèse de doctorat de l’Université de Bretagne Occidentale, Novembre 2006
- [8]Manuel Sánchez-Renedo, Roberto Gómez-García, José I. Alonso and César Briso-Rodríguez, “Tunable Comblin Filter With Continuous Control of Center Frequency and Bandwidth”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 53, no. 1, January 2005.
- [9]Aurélien PERIGAUD, « Conception de banques de filtres micro-ondes passifs compacts dans la bande 2-20 GHz à l’aide des technologies multicouches », Université de Limoges, Mars 2009
- [10]Yunchi Zhang, Kawthar A. Zaki, Andrew J. Piloto, and Joseph Tallo, “Miniature Broadband Bandpass Filters Using Double-Layer Coupled Stripline Resonators” , IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, VOL. 54, NO. 8, Aout 2006

Chapitre IV: Composants accordables

I. Introduction

Les filtres accordables sont des composants qui voient leur fréquence de fonctionnement et/ou leur bande passante se modifier lorsqu'on leur applique une commande spécifique. Ainsi, ils peuvent sélectionner ou rejeter la fréquence désirée. Ces dispositifs permettent plus ou moins dynamiquement de sélectionner/supprimer un canal de transmission à la demande. Ils évitent ainsi les redondances des systèmes de filtrage et donc permettent une réduction de la taille des systèmes de communication. Aujourd'hui, les filtres accordables utilisent des diodes varactors, des capacités commutées en semi-conducteurs, en BST, des switches ou capacité variables MEMS, ... pour rendre « agile » leur fréquence de résonance.

Les filtres accordables ont été énormément développés durant les dernières années grâce à leurs performances dans différents domaines comme dans les applications sans fils, les systèmes de communications et radars [1, 2].

Comme montré au chapitre précédent, des possibilités d'imprimer différents matériaux (métal, diélectrique de forte permittivité) en même temps ont donc émergées. Une suite fortement envisageable ici est d'utiliser la technologie jet d'encre pour imprimer des filtres planaires accordables où les résonateurs, les lignes et les pads de polarisation ainsi que les éléments de découplage (capacité voire résistance) pourrait être imprimés et cuit en même temps. Via une étape de report d'éléments accordables (diodes varactors par exemple), qui eux ne peuvent pas (encore) être imprimés, ce circuit imprimé deviendrait pilotable.

Dans cette optique, ce chapitre est découpé en trois parties :

- un travail préliminaire a tout d'abord été effectué visant à extraire un modèle équivalent de diode varactor. Pour cela un système simple de résonateur planaire est proposé pour déterminer la résistance série associée à ce composant et permettre de vérifier la valeur de la capacité présentée en fonction de la tension de polarisation.
- un résonateur de type SIW (imprimé par jet d'encre) intégrant à sa surface une diode varactor. L'objectif ici est d'étudier un système accordable simple mais présentant un bon ratio facteur de qualité / accord en fréquence dans un encombrement minimal.
- enfin, dans l'optique du chapitre de qualifier plusieurs technologies de résonateurs accordables, un résonateur diélectrique à accord piézoélectrique est proposé.

II. Accord en fréquence par report de composants montés en surface

Différents composants HF (résonateurs, filtres, déphaseurs, ...) peuvent être rendus accordables lorsqu'on leur ajoute un composant de type capacité ou inductance variable qui sont dans leur grande majorité à pilotage électrique. Leur choix est d'une grande importance puisqu'ils agissent directement sur les performances de la structure. Différentes technologies peuvent alors être utilisées :

Les diodes ou transistors varactors consistent à commander la tension de polarisation du dispositif en régime de fonctionnement inverse : ainsi, le comportement prédominant de la diode ou du transistor est défini par sa capacité de jonction variable en fonction de la tension continue de polarisation. Le temps de commutation est bien meilleur que celui obtenu en technologie MEMS notamment. Néanmoins, la non-linéarité de ces dispositifs limite leur utilisation à des applications faible puissance.

Les diodes Schottky se classent dans la catégorie des capacités variables. Elles ont pour avantage de consommer très peu. En revanche, elles ne possèdent pas une bonne tenue en puissance et génèrent beaucoup de distorsions. [3]

Les diodes PIN peuvent avoir la fonction de commutateur capacitif si on leur ajoute une capacité fixe en série. Elles sont intéressantes pour leur forte tenue en puissance et leur faible sensibilité en température. En revanche, elles consomment beaucoup de puissance et sont limitées en fréquence car leur facteur de qualité diminue fortement avec celle-ci [4].

Les MEMS RF de type capacitifs, ou ohmiques en série avec une capacité fixe peuvent également être utilisés. Ils possèdent un bon facteur de qualité, ne consomment pas de puissance, ont un bon rapport capacitif et possèdent une bonne linéarité. Leur principal inconvénient est leur vitesse de commutation plus faible que des composants à jonction.

Les filtres YIG (Yttrium-Iron-Garnit) sont constitués d'une bille qui résonne à des fréquences différentes selon le champ magnétique qui lui est appliqué. Ils possèdent de très bonnes performances (très large bande d'accord, très peu de pertes) mais consomment beaucoup de courant (0.3-3 A). Ils ont également besoin d'être à température constante, requièrent un aimant qui est assez lourd et sont difficiles d'intégration [5].

Le Tableau IV- 1 présente la comparaison des différents composants accordables intégrant des filtres reconfigurables :

	YIG	BST (ferroélectrique)	Diode Schottky	Diode PIN	MEMS RF	Diode varactor
Q	500-2000	30-150	30-150	$R_s = 1 \Omega$	50-400	4000 à 50MHz
Plage d'accord	2-18 GHz	$C_r = 2-3$	$C_r = 3-5$	Haute	$C_r = 2-100$	$C_r = 0,1-5pF$
Vitesse de commut.	ms	ns	Ns	ns	μs	ns
Linéarité (IP3)	20 dBm	10-35 dBm	10-35 dBm	> 33 dBm	>60	10-35dBm
Tenue en Puissance	50-200 mW	10-100 mW	10-100 mW	Haute	0.1-1 W	10-100mw
Consommation	0.5-5 W	0	0	20-30 mA	0	0
Sensibilité en temp.	Fort	Fort	Faible	Faible	Faible	Faible
Intégration	3D	2D	2D	2D	2D	2D
Coût	Elevé	Bas	Bas	Bas	Bas	Bas

Tableau IV- 1 : Comparaison des différents composants accordables intégrant des filtres reconfigurables [6, 7].

Pour des raisons de performances, de disponibilités et d'intégration relativement simples, les diodes varactors sont sélectionnées pour la suite. Les diodes varactors utilisées dans ce chapitre sont des diodes GaAs varactors MV39002-p2715 de Microsemi (1,8-0,09 pF pour $V=0-15$ V typiquement). Elles sont packagées dans un boîtier plastique de 0,7 mm x 0,4 mm et sont à reporter par une méthode de flip-chip. Le choix s'est porté sur ce modèle parce qu'il présente trois des éléments nécessaires au travail mené dans ce chapitre 4 : une taille réduite, une valeur de résistance série annoncée faible et un rapport de capacité proche de 20 laissant espérer un bon potentiel pour rendre accordable des résonateurs.

Ces diodes varactors sont utilisées polarisées en inverse et présentent le modèle électrique équivalent donné à la Figure IV- 1.

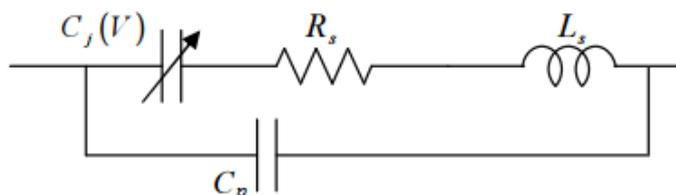


Figure IV- 1: Modèle électrique équivalent d'une diode varactor polarisée en inverse

D'après la fiche technique du composant, ce varactor présente : une résistance série R_s évaluée à 0,5 Ohm, une capacité parasite C_p de 0,02 pF. L'inductance série L_s sera considérée à 1 nH. Etant donné que ce type de composant sera reporté via l'utilisation d'une colle époxy contenant des particules d'argent, nous augmenteront volontairement la valeur de R_s à 1,5 Ω , considérant que la colle ramène au moins 1 Ω .

III. Modèle équivalent d'une diode varactor

Afin de faciliter l'intégration de ces diodes varactors dans ces systèmes accordables, il peut être intéressant d'avoir à disposition un système simple permettant l'extraction à différents points fréquentiels et pour différentes tensions de polarisation, des paramètres équivalents de ces varactors.

En effet il nous apparaît pertinent de vérifier si la résistance série équivalente présentée par ce composant dépend de la tension appliquée. Une variation de R_s est-elle attendue par rapport à la fréquence de travail. La confirmation de la valeur de la capacité variable en fonction de la tension de polarisation est aussi souhaitée. Notre but à cette étape est donc de trouver un modèle équivalent simple sur la base de celui présenté dans le paragraphe précédent en particulier pour la résistance série (R_s) et la capacité variable (C_j) d'une diode varactor.

Deux structures ont été utilisées dans cette optique :

- un résonateur hairpin à fort accord en fréquence permettant de confirmer la valeur de la capacité liée à la tension de polarisation appliquée à la diode varactor.
- un résonateur $\lambda/2$ à faible accord en fréquence permettant d'extraire la valeur de la résistance série avec la variation de la tension de polarisation sur une bande de fréquence étroite. Nous espérons ici confirmer que R_s ne dépend que peu de la tension de polarisation.

III.1. Résonateur Hairpin

Le filtre à base de résonateurs hairpin est l'une des configurations microruban les plus utilisées pour les filtres planaires [8]. Il est facile à fabriquer, car il possède des extrémités en circuit ouvert qui ne nécessitent aucune mise à la masse et peut être optimisé facilement.

Les objectifs principaux de ce résonateur hairpin demi-onde, sont d'assurer un fort accord en fréquence et l'intégration aisée d'une diode varactor en parallèle. Ce résonateur qui sera fabriqué en Cuivre (épaisseur $5\mu\text{m}$, $\sigma = 30 \text{ S}/\mu\text{m}$) sur un substrat d'Alumine ($\epsilon_r = 9,1$; $\tan\delta = 0,0001$, épaisseur = $0,7\text{mm}$), a été dimensionné pour résonner à une fréquence de $6,3 \text{ GHz}$ sans varactor comme le montre la Figure IV- 2 :

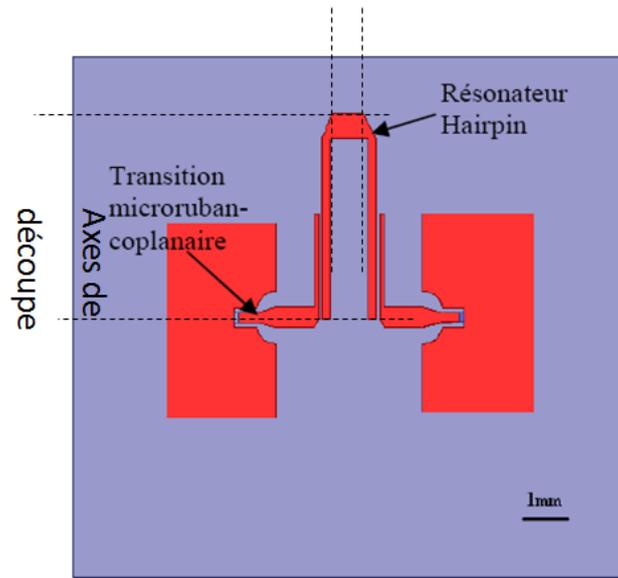


Figure IV- 2 : Résonateur hairpin

Pour assurer une mesure aisée de ce système, une transition coplanaire-microruban a été ajoutée entre la zone réservée aux pointes coplanaires et la ligne microruban permettant l'excitation du résonateur hairpin.

La réponse de ce résonateur sans élément d'accord est présentée dans la Figure IV- 3 :

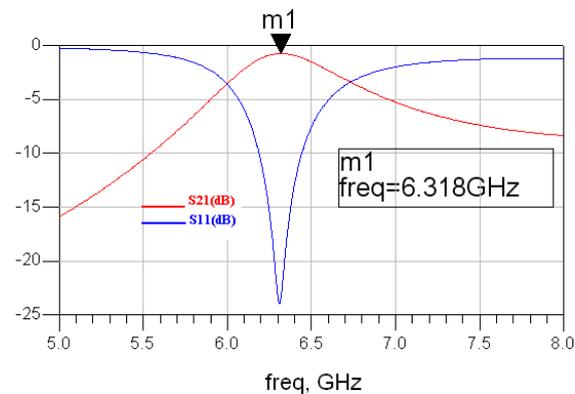


Figure IV- 3 : Paramètres S simulés du résonateur hairpin seul

Une diode varactor est ajoutée entre les deux extrémités (où le champ électrique est maximum) pour assurer un fort accord en fréquence. Des capacités de découplage de forte valeur (10 nF) ainsi qu'un pad permettant la polarisation de la diode varactor sont rajoutés sur le design initial comme montre la Figure IV- 4 :

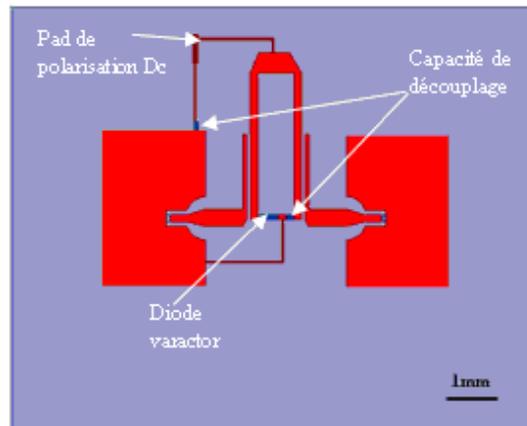


Figure IV- 4 : Résonateur Hairpin accordable simulé sur HFSS

Afin d'évaluer la sensibilité de la fréquence de résonance en fonction du varactor choisi, la Figure IV- 5 présente la réponse en simulation (HFSS) du résonateur avec trois valeurs différentes de capacité variable (0,1 pF, 0,5 pF et 1 pF) qui sont celles aisément atteignables par le varactor Microsemi MV39002-P2715. La valeur considérée de la résistance série de ce varactor est de 1,5 Ω , la capacité parasite 0,02 pF et l'inductance série de 1 nH.

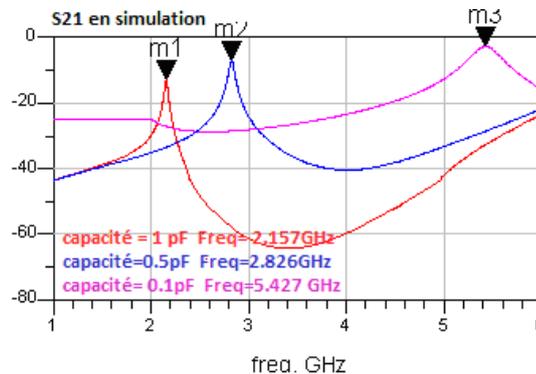


Figure IV- 5 : S_{21} simulé pour trois valeurs des capacités 0,1pF, 0,5pF et 1pF

Un accord en fréquence de 60% est observable entre les deux valeurs extrêmes des capacités, ce qui devrait permettre une extraction aisée des valeurs expérimentales de C_j . Les facteurs de qualité attendus (28 à 2,15 GHz, 50 à 5,4 GHz) risquent cependant de rendre peu aisé mais néanmoins possible l'extraction de R_s pour différents points de fréquence.

Le modèle équivalent attaché à cette structure est divisé en deux parties : une partie concerne le résonateur (circuit RLC parallèle) et l'autre le modèle équivalent de la diode varactor. Ce modèle est présenté dans la Figure IV- 6 :

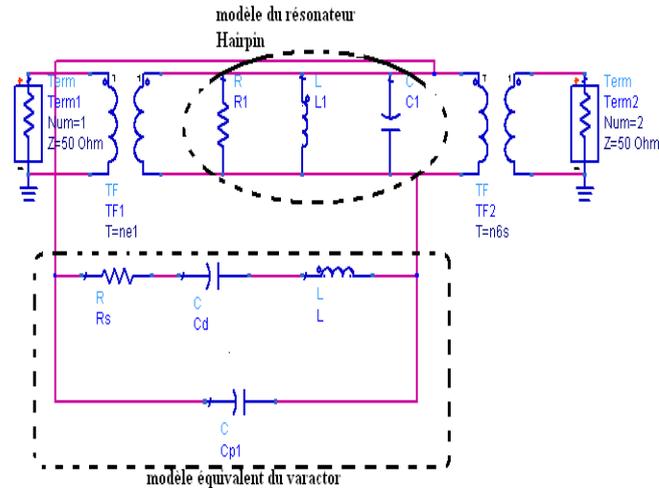


Figure IV- 6 : Modèle électrique du résonateur Hairpin accordable

Nous commencerons par déterminer les valeurs R, L et C équivalentes du résonateur seul sans diode varactor en mesurant sa réponse en fréquence. Il suffira ensuite d'identifier les valeurs de C_j et R_s à partir des relevés expérimentaux des variations des fréquences de résonance et de facteur de qualité une fois le résonateur équipé d'une diode varactor.

La pertinence de ce modèle a été évaluée en comparant la réponse de la simulation EM (HFSS) avec la réponse obtenue avec ce modèle en fixant les paramètres du résonateur et en faisant varier la capacité C_j (Figure IV- 7).

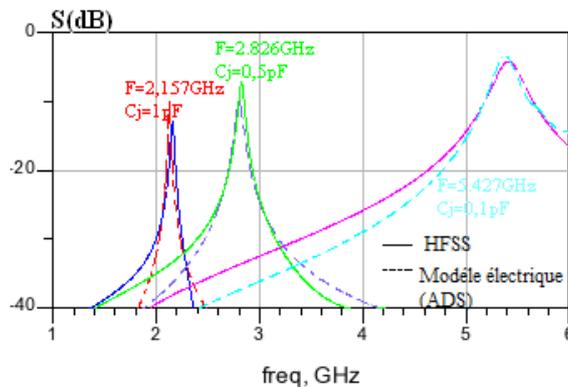


Figure IV- 7 : Comparaison du modèle équivalent avec une simulation HFSS

Ce test confirme que le modèle équivalent proposé permet de retrouver le comportement en fréquence simulé électromagnétiquement. Un test expérimental à suivre est cependant nécessaire pour confirmer ce résultat.

III.2. Résonateur planaire $\lambda/2$

Ce type de résonateur $\lambda/2$ sera utilisé pour déterminer la valeur de la résistance série de la diode varactor avec une structure qui présente un faible accord en fréquence (quelques

% seront suffisant) autour de 6 GHz. Ce résonateur $\lambda/2$ est présenté dans la Figure IV- 8 suivante :

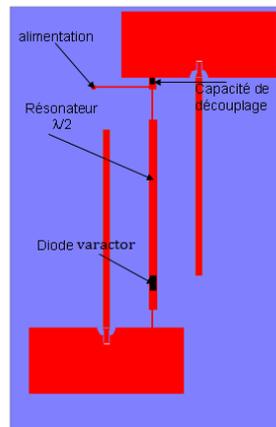


Figure IV- 8 : Résonateur $\lambda/2$ simulé sur HFSS

Les facteurs de qualité attendus sont de 71 à 6,5 GHz et 65 à 6,35 GHz pour les valeurs respectives de capacité de la diode varactor de 0,1 pF et 1 pF. La réponse en fréquence (paramètre S_{21}) du résonateur avec une variation de la capacité C_j de 0,1 pF à 1pF confirme un faible accord en fréquence (2%) comme le montre la Figure IV- 9 :

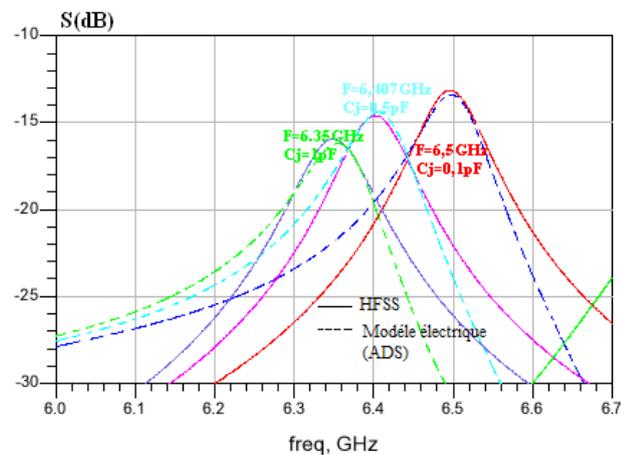


Figure IV- 9 : S_{21} simulé (HFSS) pour trois valeurs de capacité 0,1pF, 0,5pF et 1pF et réponse du modèle équivalent

La Figure IV- 9 confirme que l'utilisation du modèle équivalent présenté dans la partie III-1 peut s'appliquer à ce résonateur $\lambda/2$ (une fois les valeurs de capacité, self et résistance du modèle RLC du résonateur affinées pour correspondre à cette structure).

Cette structure présente donc contrairement à la précédente un faible accord en fréquence. Cette structure devrait nous permettre de voir l'impact de la polarisation de la diode varactor sur R_s sur une bande de fréquence très faible. Nous espérons ainsi décorrélérer l'impact de la polarisation et de la fréquence sur la résistance R_s .

Ce résonateur ainsi que la version hairpin sont actuellement en cours de fabrication.

Comme ces deux résonateurs présentent un facteur de qualité assez faible (70 dans le cas le plus favorable à 6 GHz), un résonateur volumique de plus fort Q_0 accordable est proposé et présenté dans le paragraphe suivant. Ce résonateur est proposé en guise de démonstrateur d'un système plus performant que celui d'un résonateur planaire dans un encombrement réduit.

IV. Démonstrateur quasi-volumique : résonateur type SIW accordable

Un résonateur de type SIW a été ici sélectionné pour son facteur de qualité nominal plus important (quelques centaines) et sera fabriqué en Alumine ($\epsilon_r = 9,1$; $\tan \delta = 10^{-4}$). Dans le cas choisi, les rangées de vias typiques délimitant un résonateur SIW ont été remplacées par des flancs droits qui seront métallisés par un bain chimique de Cuivre. Ce résonateur a été optimisé pour un accord en fréquence de l'ordre de 15% avec une variation de la capacité C_j de 0,1 à 1 pF. La Figure IV- 10 présente la structure simulée avec les dimensions sur HFSS.

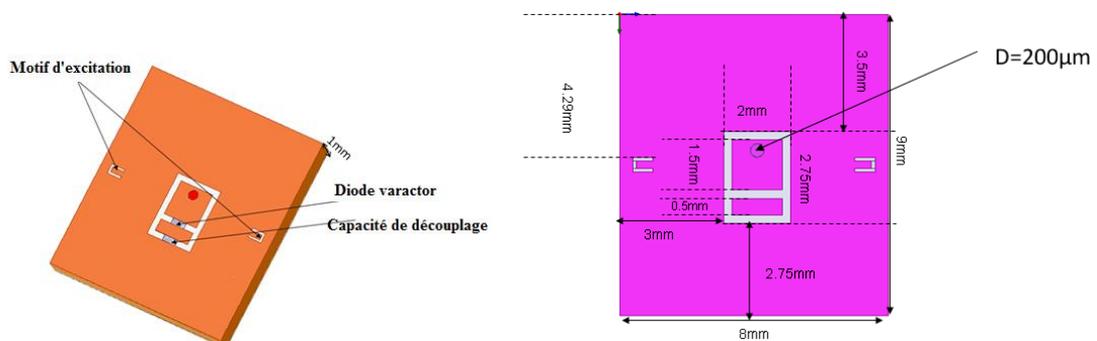


Figure IV- 10 : Résonateur SIW simulé sur HFSS

Le résonateur proposé repose sur la structure suivant : un parallélépipède en Alumine de 9 mm x 8mm x 1 mm métallisé au Cuivre (5 μm d'épaisseur La bande est ici choisie pour ce démonstrateur pour des applications de défense (guerre électronique) ou spatiale (filtre intermédiaire). Afin de rendre accordable une telle structure, deux îlots métalliques sont créés par une démétallisation localisée. Cette structure simple a été validée dans des travaux précédents [9] sur des substrats Rogers RT/Duroid 4003C laminate ($\epsilon_r= 3,55$ et $\tan\delta =0,003$). L'îlot central est doté d'un via (diamètre 200 μm) traversant et métallisé permettant de le relier électriquement à la masse. Il servira donc de point de contact à l'anode de la vara). Une telle structure résonne sur le mode TE_{101} à environ 11 GHz. ctor utilisée pour l'accord en

fréquence. Ce composant est positionné à cheval entre l'îlot central et le deuxième îlot métallique. Ce dernier servira à connecter la cathode et sera utilisé comme pad de polarisation DC. Une capacité de découplage de forte valeur (10 nF) est installée entre le deuxième îlot et le blindage général du résonateur. Dans la continuité des essais de la technologie jet d'encre présentés dans les chapitres précédents, il est tout à fait envisageable d'imprimer la face supérieure de ce résonateur (motif d'excitation et pas de polarisation).

La Figure IV- 11 montre la réponse théorique obtenue: une fréquence de résonance variant de 11,1 à 9,67 GHz soit 15% d'accord en fréquence.

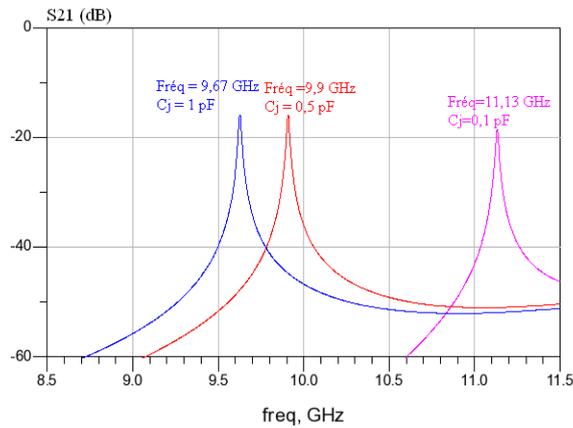


Figure IV- 11 : Réponse S21 du résonateur SIW simulé sur HFSS

Concernant le facteur de qualité que peut présenter cette structure, différentes simulations ont été menées en considérant plusieurs paramètres pour la diode varactor : une variation de capacité de 0,1 pF à 1 pF et une résistance série variant de 0,5 à 1,5 Ω (Figure IV-12).

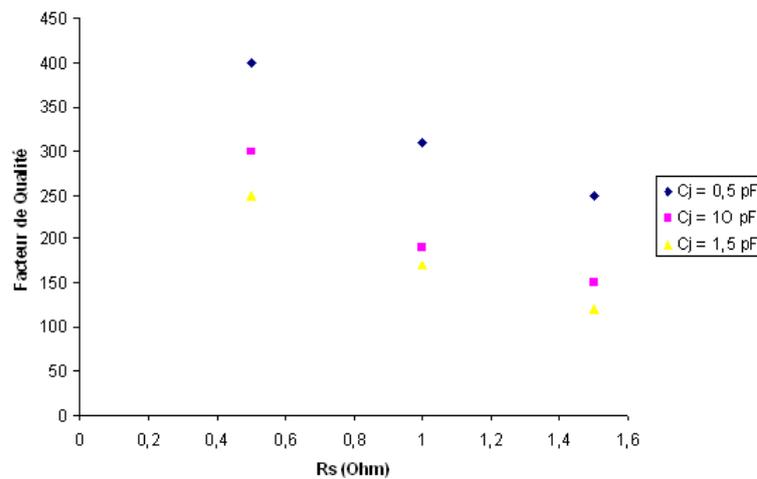


Figure IV- 12: Variation du facteur de qualité suivant la variation du Rs

L'augmentation de R_s joue comme attendu directement sur le facteur de qualité à vide. Le cas avec la plus faible valeur de capacité (0,1 pF) voit ainsi son facteur de qualité passer de 380 à 250 pour R_s respectivement de 0,5 et 1,5 Ω .

Comme observé dans les travaux précédents [9] le facteur de qualité à vide sur une telle structure est directement lié à la valeur de la capacité rajoutée. Par exemple pour $R_s=0,5 \Omega$, Q passe de 380 ($C_j = 0,1 \text{ pF}$) à 250 ($C_j = 1 \text{ pF}$). Pour expliquer ce phénomène, nous avançons l'explication que l'augmentation de la valeur de la capacité C_j rajoutée en surface du résonateur force une concentration de champ électrique du mode TE_{101} dans une zone très proche des de la face supérieur du résonateur où les pertes métalliques deviennent prépondérantes et limitent le facteur de qualité Q_0 global du résonateur.

Les valeurs globales de Q_0 restant assez élevées (plusieurs centaines) et l'accord en fréquence satisfaisant (15%), une version expérimentale de ce concept est proposée dans le paragraphe suivant.

Cette structure est fabriquée en Alumine par la technologie de stéréolithographie, au CRT CTTC (Limoges). Un dépôt auto catalytique (annexe II) de toute la structure (via traversant compris) permet un dépôt de Cuivre sur toute la structure (et le long du via).

Après la métallisation et la gravure des motifs par ablation laser, les composants (diode varactor et la capacité de découplage 10 nF) ont été collés sur le résonateur à l'aide d'une colle époxy chargée de particules d'argent. La Figure IV- 13 montre la structure après fabrication :

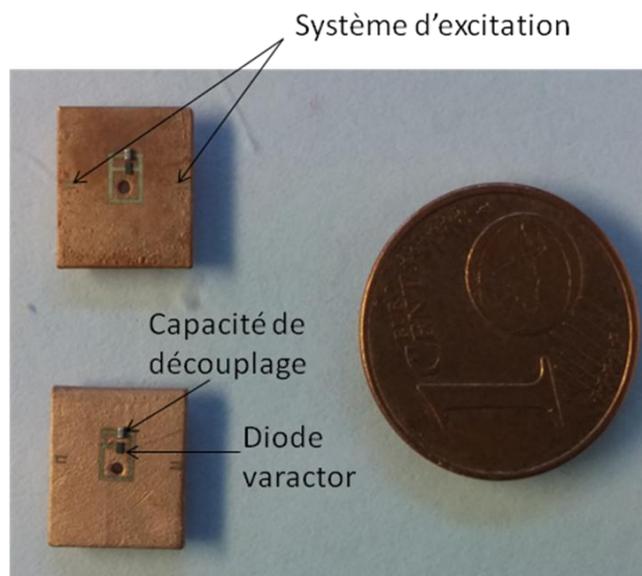


Figure IV- 13 : Réalisation du résonateur SIW

La Figure IV- 13 montre les résultats expérimentaux avec une fréquence de résonance variant de 9 GHz (polarisation = 0V) à 10,3 GHz (polarisation = 10 V) soit 12% d'accord en fréquence pour 15% attendu en simulation.

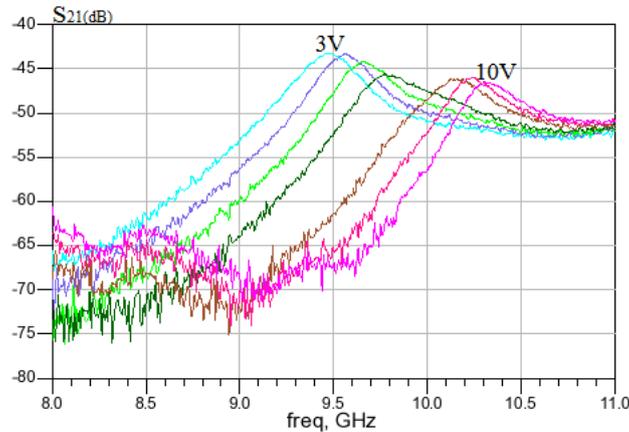


Figure IV- 14: Réponses mesurées du résonateur après fabrication

Le facteur de qualité est par contre très faible avec une valeur maximale de 50. Le Cuivre déposé s'est très vite oxydé présentant donc une conductivité bien plus faible (~ 10 S/ μm) que celle attendu en théorie (~ 40 S/ μm). Néanmoins cette conductivité n'est pas suffisante pour expliquer une faible valeur de Q_0 . Il faut se tourner du côté de la colle époxy qui, bien que très pratique pour ce genre de collage de composants, ramène plusieurs Ohms de résistance de contact en particulier à haute fréquence (10 GHz et au-dessus). Cette dernière s'avère donc non adaptée.

Un nouvel essai est en cours pour utiliser une couche de Cuivre de meilleure qualité (Cuivre + protection par une couche d'Or) et un report par soudure plutôt que par cette colle époxy.

V. Résonateur accordable par actionneur piézoélectrique

Dans les buts définis de ce chapitre IV, nous cherchons à qualifier quelques approches de résonateurs accordables. Pour cela, un autre système d'accordabilité avec un actionneur piézoélectrique est ici étudié.

La piézoélectricité est la propriété que présentent certains cristaux de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique. Cette polarisation induite est proportionnelle à la contrainte mécanique appliquée et change de signe avec celle-ci. Ce

phénomène décrit la piézoélectricité directe. A l'inverse, l'application d'un champ électrique externe induit une déformation mécanique du cristal : c'est l'effet piézoélectrique inverse. (Figure IV- 15)

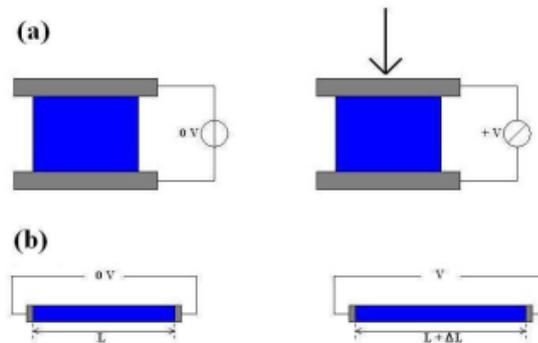


Figure IV- 15: Illustration de l'effet piézoélectrique direct (a) et inverse (b).

La propriété piézoélectrique d'un matériau est liée à sa structure cristalline. En effet, on observe cette caractéristique que dans certains solides non-conducteurs possédant une anisotropie cristalline caractéristique. Dans ces matériaux, on définit l'axe de polarisation comme l'axe privilégié d'apparition des charges électriques dans la structure.

V.1. Principe de fonctionnement

Cette structure a initialement été proposée par le Pr. R. Mansour [10] et sera ici reprise dans un premier temps comme point de départ afin de converger à terme sur une structure toute céramique qui sera présentée dans la partie V.2. Pour référence, cette structure présentait des facteurs de qualité expérimentaux de 536 à 548 pour un accord en fréquence de 5,6% entre 4,991GHz et 4,709 GHz.

La structure utilisée est constituée de trois parties (Figure IV- 16):

- une cavité en Cuivre
- un résonateur diélectrique de forte permittivité (Zircone, $\epsilon_r=32$)
- un film de Cuivre refermant la cavité
- un actionneur piézoélectrique

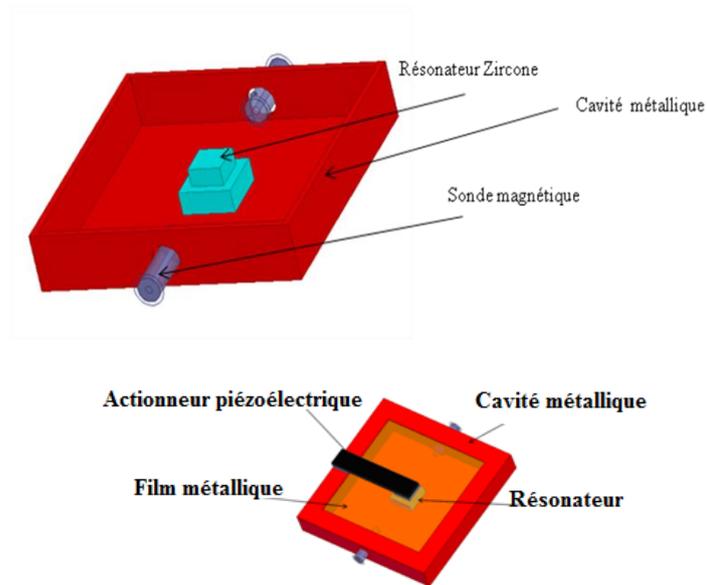


Figure IV- 16 : Cavité simulée sur HFSS

L'actionneur piézoélectrique choisi est le modèle CMBP01 de Noliac [11] qui permet d'atteindre en théorie un déplacement de 195 μm pour une tension de polarisation de 0 à 100V.

Cet actionneur est positionné en contact du film de Cuivre refermant le dessus de la cavité. Son actionnement vient modifier le gap très faible (quelques dizaines de μm) entre le sommet du résonateur diélectrique et le film venant ainsi fortement modifier l'effet capacitif créé en cet endroit précis (Figure IV- 17). Le résonateur diélectrique a été optimisé vers cette forme pyramidale afin de maximiser l'effet capacitif créé.

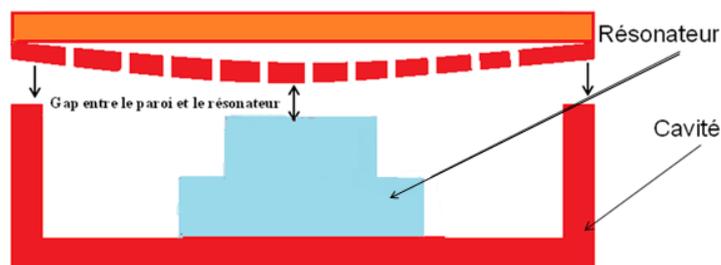


Figure IV- 17: principe de la structure (vue en coupe),

La modification de ce gap entraînera alors une variation considérable de la fréquence de résonance du résonateur 3D. La courbe suivante présente le tracé du champ électrique dans le cas où l'actionneur n'est pas activé (Figure IV- 18).

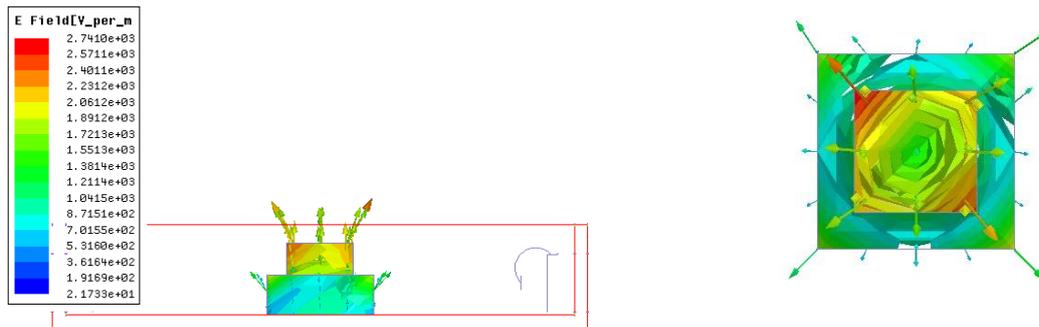


Figure IV- 18: Champ électrique dans le résonateur à sa résonance (f = 5GHz)

Nous considérons un gap de $35\mu\text{m}$ entre le sommet du résonateur en Zircone et le film de Cuivre supérieur. Le résonateur en zircone a été simulé avec une permittivité de 32 et une tangente de pertes de 0,001. La cavité métallique a une dimension intérieure de 20 mm x 20 mm en considérant une conductivité de $40\text{ S}/\mu\text{m}$ (de même pour le film en Cuivre). La structure est excitée par deux sondes magnétiques permettant d'exciter le mode de résonance TE_{011} observé à 7,15 GHz pour un facteur de qualité à vide théorique de 1270.

La Figure IV- 19 montre la variation de la fréquence de résonance et du facteur de qualité du résonateur diélectrique pour un gap considéré variant ici de $35\mu\text{m}$ à $5\mu\text{m}$.

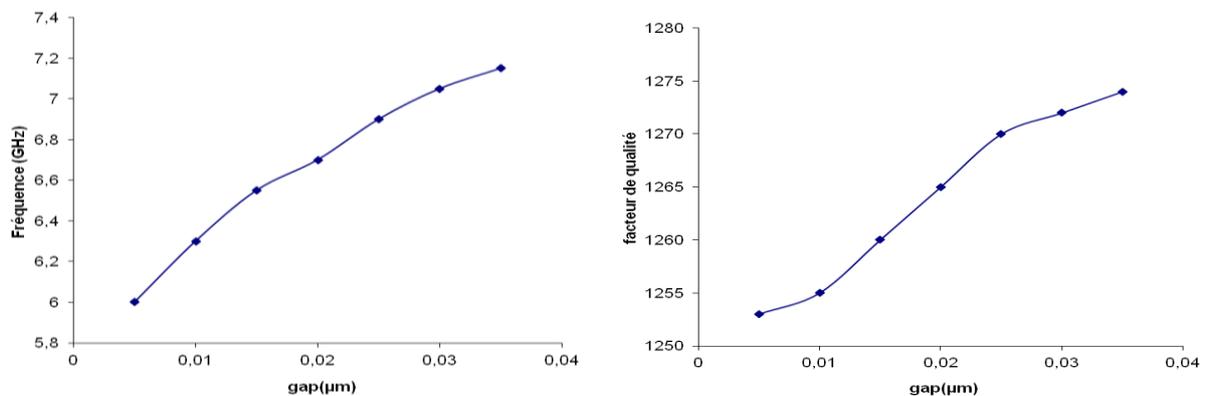


Figure IV- 19 : Variation de la fréquence et du facteur de qualité en fonction du gap

Le facteur de qualité est très stable autour de la valeur moyenne de 1265 grâce, sans doute, à la forte permittivité de la Zircone conservant un maximum de champ E dans le résonateur. La fréquence de résonance se voit cependant fortement changée de 7,15 GHz à 6 GHz pour une modification du gap de $-30\mu\text{m}$, soit un accord en fréquence de 16%.

V.2. Mesures expérimentales

Après la validation de cette structure par simulation, nous sommes passés à l'étape de la réalisation. La cavité métallique de 20 mm x 20 mm a été fabriquée en Cuivre. Nous sommes ensuite venus coller le résonateur au centre de cette cavité. La paroi métallique supérieure est collée sur le sommet de la cavité à l'aide d'un film de Cuivre présentant une face adhésive. L'actionneur piézoélectrique est ensuite appliqué sur le sommet de ce montage où l'on viendra ensuite appliquer une tension qui varie entre 0 et 100 V (Figure IV- 20).

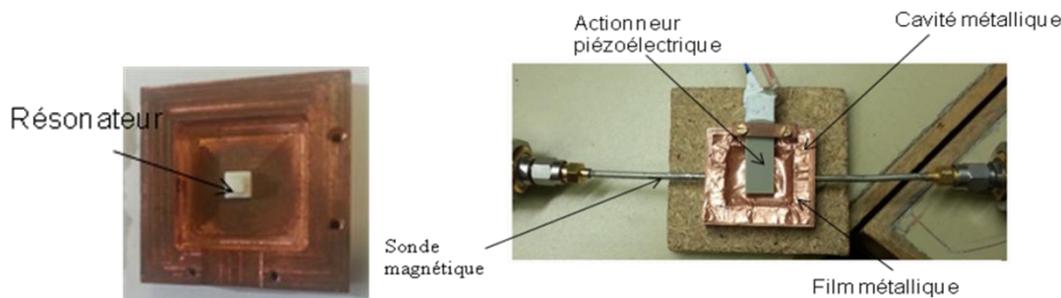


Figure IV- 20: Structure fabriquée et mesurée

Le tableau IV-2 donne les valeurs expérimentales extrêmes mesurées pour une tension d'activation nulle et une tension de 100V.

Tension (V)	Q_0	Fréq (GHz)
0	450	7,16
100	200	6

Tableau IV- 2 : Variations du facteur de qualité et de la fréquence mesurées de la structure

Une plage d'accord continue entre 7,16 et 6 GHz est observée, ce qui correspond dans le modèle simulé à un déplacement de la paroi supérieure de 30 μm . Les facteurs de qualité ont des valeurs entre 450 (0V) et 200 (100V).

Deux points apparaissent dans l'analyse de ces résultats.

- Pour une tension de 100V, l'actionneur piézoélectrique peut présenter une variation de 195 μm or la variation en fréquence n'est en simulation que de 30 μm pour expliquer la variation observée de la fréquence de résonance du RD en Zircone. Nous pensons que le film de Cuivre qui nous a servi à fermer le dessus de la cavité et qui est collé sur ses bords est fortement tendu dans cette configuration. Il faut à ce moment développer avec l'actionneur une force importante pour provoquer cette faible déformation de 30 μm .
- Concernant le facteur de qualité à vide, des simulations complémentaires ont été menées qui tendent à montrer que la tangente de pertes de la zircone est plus

proche de 0,005. La conductivité de la cavité en Cuivre serait, elle, plus proche de 30 S/ μm . Enfin le film de Cuivre utilisé possède une face adhésive qui a servi pour le montage de l'ensemble. Il est probable que cette colle rajoute des pertes diélectriques supplémentaires qui ont été sous-estimées et que l'on peut modéliser par une conductivité équivalente de ce film assez faible de l'ordre de 5 S/ μm . Cette configuration permet de retrouver (Figure IV- 21) les performances obtenues pour une polarisation de 0V.

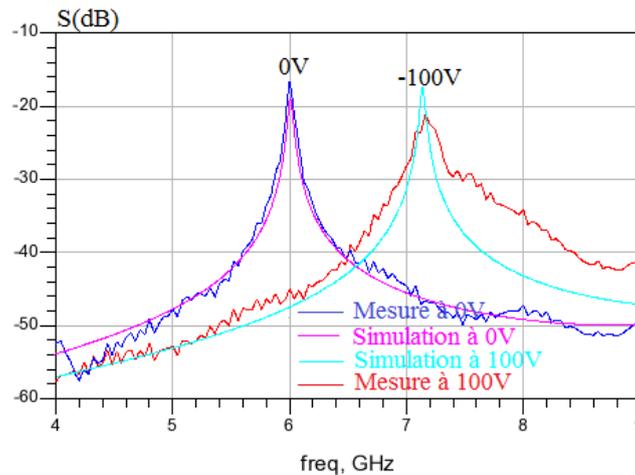


Figure IV- 21 : Mesure de la structure accordable à 0 et -100V

Une simulation de la structure tenant compte de ces paramètres plus réalistes confirme qu'un gap de l'ordre de 30 μm amène le décalage observé expérimentalement mais pas la baisse de facteur de qualité pour la polarisation de 100V. Une observation de la structure réalisée (Figure IV- 20) permet de voir que le film Cuivre déposé se déforme d'une manière non homogène et donc difficilement modélisable. Il est probable qu'une fois l'actuateur polarisé, le film métallique ramène sur la structure plus de pertes métalliques que prévues.

V.3. Structure monobloc céramique

Une évolution de la structure précédente est proposée dans cette partie. Dans un objectif d'améliorer le facteur de qualité de cette structure, nous envisageons déjà de remplacer la Zircone qui présente une tangente de pertes assez forte par la céramique BMT [12] qui possède, à ces fréquences, une tangente de pertes inférieure à 10^{-4} tout en conservant une permittivité élevée de 24,7. Ensuite, nous envisageons de remplacer complètement la cavité en Cuivre par une cavité en BMT recouverte sur ses faces extérieures de Cuivre. La

cavité contient un résonateur de forme pyramidale reposant sur le même principe que pour le résonateur Zirconé.

La Figure IV- 22 reprend le même principe de fonctionnement mais cette fois-ci en considérant l'ensemble comme un objet monobloc en BMT dont les principales dimensions sont présentées.

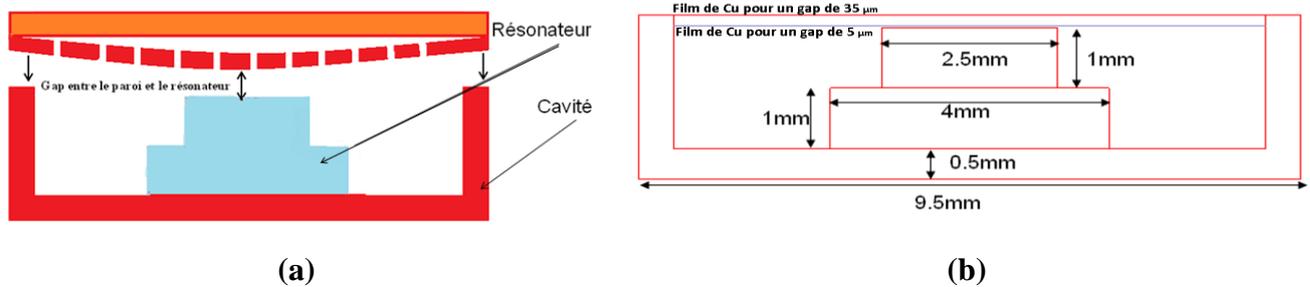


Figure IV- 22 : (a) Principe de la structure (vue en coupe), (b) dimensions de la structure monobloc BMT

Cette structure monobloc, toujours excitée par des sondes magnétiques, a été optimisée pour résonner comme précédemment à 7 GHz. Grâce au BMT et au Cuivre déposé sur les parois extérieures de cette dernière, elle peut théoriquement atteindre des facteurs de qualité à vide proches de 2600. Elle permet d'atteindre comme précédemment une variation de la fréquence de résonance du RD en BMT de 15% environ pour un déplacement du film de Cuivre recouvrant la cavité BMT de 30 μm . La Figure IV- 23 résume les performances simulées pour différentes valeur du gap entre le sommet du RD en BMT et le film servant de couvercle à la cavité.

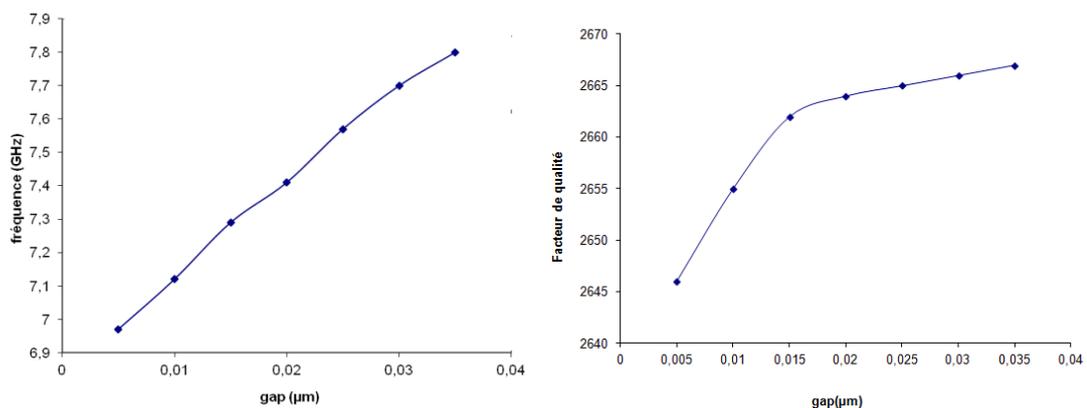


Figure IV- 23: variation de la fréquence et le facteur de qualité en fonction de la variation du gap

Le potentiel est ici très intéressant avec un facteur de qualité restant constamment autour de 2600 sur toute la plage d'accord en fréquence. Il faudra néanmoins répondre au problème du montage vu sur la structure à cavité en Cuivre et résonateur en Zirconé pour pouvoir envisager de passer à cette structure monobloc en BMT.

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, trois structures accordables sont présentées :

- Deux résonateurs planaires sur lesquels sont prévues d'être reportés des diodes varactors. Leur vocation est de permettre une extraction in situ des valeurs de la résistance série (R_s) et de la capacité variable (C_j) issus du modèle équivalent de ces diodes à partir d'un résonateur simple. Une première version à faible accord en fréquence permettrait d'étudier R_s en fonction de la polarisation appliquée sur le varactor. Une deuxième dont la plage d'accord est plus importante est proposée afin de vérifier aisément les valeurs de C_j en fonction de la polarisation appliquée sur le varactor.
- Un résonateur de type SIW sur lequel une diode varactor est reportée. Le principe, bien que validé pour l'accord de fréquence observé (~12%), nécessite d'être repris en particulier au niveau de la colle qui a servi au report des composants. Cette dernière ramène trop de résistance parasite, ce qui nuit très fortement au facteur de qualité à vide atteignable (50 pour plus de 200 attendu).
- Enfin un résonateur diélectrique en céramique (Zircone) associé à un actuateur piézoélectrique. Ici aussi le principe a été validé avec un accord en fréquence de 16%. Il faut cependant améliorer le système de montage du film métallique déposé sur la cavité entourant le résonateur diélectrique et préférentiellement passer à une céramique plus faible pertes (BMT) pour espérer obtenir des facteurs de qualité supérieurs à 2500. En effet, les facteurs de qualité à vide obtenus expérimentalement avec le RD en Zircone sont de 200 à 450. Le potentiel est pleinement intéressant car dans la configuration à long terme proposée en BMT, il serait possible d'obtenir un Q_0 proche de 2600 et restant stable sur la plage d'accord de 16%. Mais il faudra pour cela résoudre prioritairement les problématiques de montage global de la structure.

VII. Référence de chapitre IV

-
- [1]F. Huang and R. R. Mansour, “Tunable Compact Dielectric Resonator Filters”, Proceedings of the 39th European Microwave Conference
- [2]Romain Stefanini, Mathieu Chatras, Pierre Blondy, “Compact 2-pole and 4-pole 1.5-9GHz Constant Absolute Bandwidth Tunable Filters, 5th International Workshop on Microwave Filters, Oct 2012
- [3]F. Mohammed, M.F. Bain, F.H. Ruddell, D. Linton, H.S. Gamble, V.F. Fusco, “A novel silicon Schottky diode for NLTL applications,” IEEE transaction on Electron Devices, vol. 52, pp. 1384-1391, July 2005
- [4]D. Hoag, J. Brogle, T. Boles, D. Curcio, D. Russell, “ Heterojunction PIN diode switch,” 2003 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, vol. 1, pp. 255-258, June 2003
- [5]M. R. B. Dunsmore, J. Clarke “High Power Tunable YIG filters,” 11th European Microwave Conference, pp. 405-411
- [6]G.M. Rebeiz, K. Entesari, I. Reines, S. Park, M. El-Tanani, A. Grichener, A. Brown, “ Tuning into RF MEMS“, IEEE Microwave Magazine, Vol. 10, No. 6, pp.55-72, October 2009
- [7]Romain STEFANINI, « Commutateurs MEMS et leurs applications aux filtres accordables fort Q », Université de Limoges, novembre 2011
- [8]Jia-Sheng Hong, Michael J. Lancaster “Cross-Coupled Microstrip Hairpin-Resonator Filters”, IEEE Transactions on microwave theory and techniques, VOL. 46, NO. 1, JANUARY 1998
- [9]S. Sirci, J.D. Martínez , M. Taroncher, V.E. Boria, “Varactor-Loaded Continuously Tunable SIW Resonator for Reconfigurable Filter Design”, 41st European Microwave Conference, 2011
- [10] F. Huang and R. R. Mansour, “Tunable Compact Dielectric Resonator Filters”, 39th European Microwave Conference, 2009
- [11]www.noliac.com

Conclusion générale

Ce travail de thèse a été l'occasion de développer une technologie innovante, la technologie jet d'encre développée issue du laboratoire SPCTS et actuellement transférée à la PME CERADROP (Limoges). Cette technologie multicouche a été testée par l'impression des motifs en argent et des structures multicouches.

Au cours du premier chapitre, nous avons procédé à une étude bibliographique comparative sur les technologies de fabrication multicouches. Un état de l'art de la technologie jet d'encre est, en particulier, présenté dans ce chapitre avec une comparaison avec d'autres technologies comme le LTCC qui se présente comme très proche en termes d'objets réalisables. Nous avons procédé à une étude bibliographique sur les technologies de filtre utilisées dans le domaine des hyperfréquences. Cette étude nous a permis de comparer les différentes technologies de filtrage et de faire ressortir les plus courantes.

Dans le deuxième chapitre, nous avons expérimenté cette technologie pour tout d'abord établir différentes règles de conception à appliquer pour la création de composants HF imprimés : la conductivité de l'encre métallique à base de nanoparticules d'argent (20 S/ μm jusqu'à 20 GHz), une précision de fabrication de l'ordre 24 μm et la possibilité de réaliser sans réelle contraintes des motifs de formes très différentes. Après la validation de ce premier test d'impression 2D uniquement avec une encre à base d'argent, des impressions multicouches et multimatériaux (argent – céramique - argent) ont validé l'aspect multicouche de cette technologie après un développement de l'encre diélectrique basée sur la céramique Heraeus 51K65 à cuisson basse température effectuée par le laboratoire SPCTS.

Après la réussite de cette première fabrication multicouche (capacité métal – diélectrique – métal), le troisième chapitre présente un filtre interdigité multicouche développé pour la fabrication par la technologie jet d'encre. Par rapport à une structure équivalente basée sur le principe des filtres interdigités imprimée en argent seul, la version multicouche permet un gain de taille de près de 66% pour des performances équivalentes. Une comparaison avec une structure similaire en LTCC est de même avancée et le filtre multicouche imprimé permettrait un gain de surface de 25% à performances équivalentes.

L'aspect multicouche nous ouvre alors le chemin pour travailler sur des structures accordables qui pourraient être du même type que le filtre à capacités sur lequel les pads de polarisation des diodes varactors ou MEMS montés en surface et les éléments de découplage (capacités, résistances de forte valeur) pourraient être imprimés par cette technologie.

Dans un objectif préparatoire à cette perspective, nous avons proposé dans le quatrième chapitre un système planaire simple permettant aisément d'extraire la résistance série et la capacité variable du modèle équivalent d'une diode varactor qui servirait de composant d'accord en fréquence. Ainsi deux résonateurs planaires hairpin et demi-onde accordables respectivement à fort et faible accord en fréquence ont été proposés dans ce but. Une étude de résonateur de type SIW a été faite et permis de valider un accord en fréquence de 12% entre 9 et 10,3 GHz via un report de diode varactor à sa surface. La méthode de report est ici clairement à améliorer afin d'obtenir de facteur de qualité à vide supérieur à 200 possible avec cette structure. En effet la colle époxy à base de particules d'argent utilisée à vraisemblablement fait s'effondrer le facteur de qualité observé vers les 20. Enfin un résonateur céramique en Zircon de forme pyramidale fabriqué par stéréolithographie et placé au centre d'une cavité parallélépipédique a été rendu accordable via l'utilisation d'un film de Cuivre sur lequel un actuateur piézoélectrique applique une force de déformation. Un accord en fréquence de 12% autour de 7 GHz a été expérimentalement observé pour des facteurs de qualité variant entre 200 et 450. Une amélioration du système de montage et le recours à des céramiques de plus faible tangente de pertes (BMT) doit permettre d'obtenir des facteurs élevés (2600) restant stables sur une plage d'accord en fréquence entre 6 et 7 GHz.

La perspective la plus attrayante à ce travail repose sur l'utilisation des avancées en matière d'impression multimatériaux pour la création de filtres planaires multicouches imprimés intégrant filtre, lignes de polarisation DC et éléments passifs de découplage. Une simple étape de fabrication (et de cuisson) suivie d'un report de composants accordables (varactors, MEMS, ...) permettrait d'obtenir des filtres compacts avec une plage d'accord potentiellement très intéressante. En autres perspectives, les différents résonateurs accordables présentés dans le chapitre IV méritent clairement des études plus poussées pour exprimer expérimentalement le potentiel que nos simulations laissent espérer.

Annexe I : Etude de sensibilité des dispositifs multicouches

Le dernier design retenu est maintenant simulé en lui imposant différentes études de sensibilités qui porteront sur les paramètres susceptibles de varier par rapport au concept initial. Ces paramètres seront :

- une variation de dimensions en x-y de +/- 25 μm
- une variation sur l'épaisseur des couches métalliques de +/- 2 μm
- une variation sur l'épaisseur des couches céramiques de +/- 2 μm
- une variation de la permittivité de l'encre céramique de +/- 10%
- une variation de la hauteur du substrat de +/- 50 μm
- une variation sur la permittivité du substrat de +/- 5%

Ces études ont été menées sur les filtres interdigités sans et avec capacités.

I. Etude de sensibilité sur le filtre sans capacités

Pour ce filtre les paramètres concernant la couche d'encre céramique ne seront bien entendu pas testés.

Suite aux premières étapes de la précédente action R&T concernant la technologie jet d'encre, la tolérance typique d'impression de pistes métalliques a été déterminée aux alentours de 20 μm .

La Figure 1 résume l'ensemble des précédentes études de sensibilité à titre comparatif.

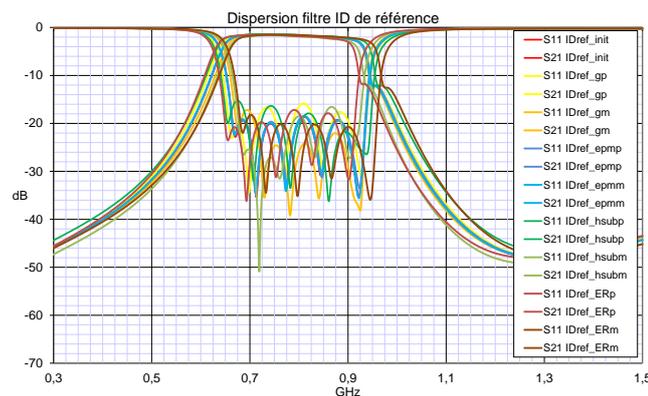


Figure 1 : Ensemble des variations étudiées sur le filtre interdigité de référence.

Cette dernière figure met en évidence que la réponse du filtre reste globalement très robuste vis-à-vis de l'ensemble des paramètres susceptibles de variations lors de la fabrication de ce dernier par la technologie jet d'encre. La fréquence centrale reste autour de sa valeur à

ANNEXE I : Etude de sensibilité des dispositifs multicouches

± 20 MHz près et la bande passante identique à ± 25 MHz. L'adaptation dans la bande dans le pire cas prévu sera de -16 dB environ.

II. Etude de sensibilité sur le filtre avec capacités

En plus des quatre paramètres précédents, l'étude de sensibilité de ce filtre à capacités imprimés en rajoutera deux supplémentaires :

- une variation sur l'épaisseur des couches céramiques composant la couche diélectrique des capacités de $\pm 2 \mu\text{m}$
- une variation de la permittivité de l'encre céramique de $\pm 10\%$

La Figure 2 présente les paramètres S du filtre à capacité en appliquant une modification sur l'épaisseur de la couche diélectrique des capacités (Heraeus 51K65) de $\pm 2 \mu\text{m}$.

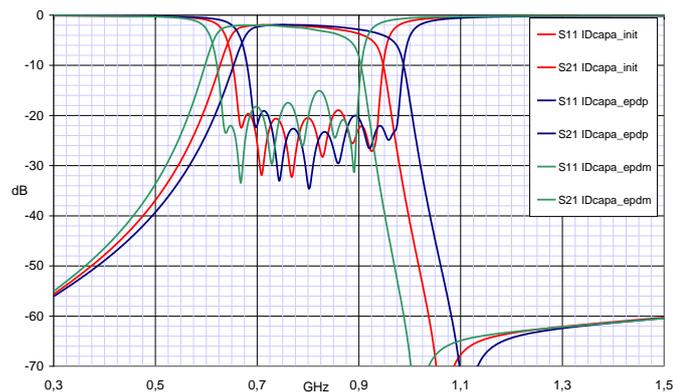


Figure 2 : Paramètres S simulés pour une variation de l'épaisseur du diélectrique (capacité) de $\pm 2 \mu\text{m}$.

Modifier cette épaisseur de diélectrique amène une variation importante de la capacité ajoutée à l'extrémité des résonateurs planaires. En conséquence augmenter l'épaisseur de cette couche de $2 \mu\text{m}$ produit une augmentation de la fréquence centrale du filtre de 35 MHz (parce que la valeur de la capacité rajoutée diminue) et une augmentation de la bande passante d'un peu plus de 10 MHz. Même dans le pire cas, l'adaptation dans la bande reste inférieure à -15 dB.

Maintenant une dispersion dans la valeur de la permittivité de la couche diélectrique de la capacité de $\pm 10\%$ est étudiée (Figure 3).

ANNEXE I : Etude de sensibilité des dispositifs multicouches

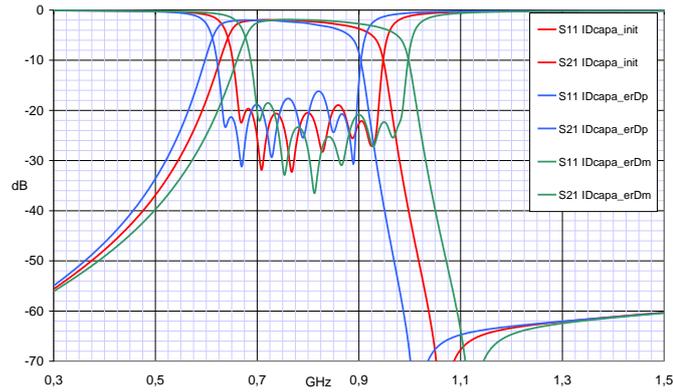


Figure 3: Paramètres S simulés pour une variation sur la permittivité du diélectrique (capacité) de $\pm 10\%$.

Ici encore cette modification joue fortement sur la fréquence de résonance des résonateurs et donc sur la fréquence centrale du filtre. Une augmentation de 10% sur la permittivité de la couche d'encre Heraeus 51K65 entraîne une augmentation de la capacité à l'extrémité des résonateurs. En conséquence, on observe logiquement une diminution de la fréquence centrale du filtre d'environ 40 MHz. La bande passante est diminuée d'environ 15 MHz. Dans tous les cas l'adaptation reste meilleure que -16 dB.

Enfin une superposition des différentes courbes précédentes est visible sur la Figure 4.

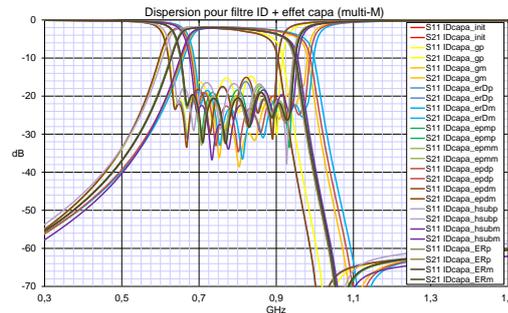


Figure 4 : Ensemble des variations étudiées sur le filtre interdigité à capacités imprimées.

En conclusion plusieurs points émergent de cette analyse :

- les modifications de la géométrie des capacités imprimées et de la permittivité de leur couche diélectrique ont un impact fort (de 30 à 40 MHz par paramètre) sur la fréquence centrale du filtre à capacité. De par la nature de ces résonateurs chargés, ce filtre sera sensible aux dispersions concernant tout particulièrement ces capacités.
- l'adaptation dans la bande passante reste bonne quelque soit le cas en étant dans le pire cas à -15 dB
- enfin la fonction de filtrage reste globalement robuste avec une conservation de l'allure des réponses et de la bande passante initiale à ± 15 MHz près.

Annexe II : Présentation de techniques de fabrication développées pour les composants céramiques 3D

I. Procédure de fabrication des vias

La contrainte forte de ce type de filtre interdigité est le besoin de produire des retours à la masse à l'extrémité de chaque résonateur. La méthode la plus performante est clairement le recours à des vias métallisés traversant permettant une connexion métallique avec le plan de masse sur la face arrière du filtre.

Le besoin de vias métallisés requiert alors de percer le substrat d'accueil avant de les métalliser, ce qui ne peut être fait par jet d'encre. Plusieurs étapes technologiques seront donc mises en place pour la réalisation de ce filtre avec dans l'ordre :

- Perçage de vias
- Métallisation sur cuivre des vias et du plan de masse
- Protection anti-oxydation par une couche d'or
- Impression des résonateurs planaires et des capacités

Le perçage de vias s'est fait au laboratoire Xlim grâce à une machine d'ablation laser, puis la technologie de dépôt autocatalytique sera utilisée pour déposer du cuivre. Une dernière étape de protection par un dépôt d'or par électrolyse terminera cet enchaînement avant impression du filtre.

I.1. Etape 1 :perçage des vias et gravure de motifs de centrage

Les vias seront percés par laser sur un substrat d'Alumine à l'aide d'une machine disponible à Xlim. Cette étape sera aussi l'occasion de venir positionner des éléments de centrage qui seront nécessaires pour l'étape d'impression afin d'aligner les têtes d'impression correctement par rapport aux différents vias traversantes. Pour information la machine d'impression jet d'encre assure une précision de positionnement mécanique de 2 μ m. Ces éléments seront des croix qui seront fait par ablation laser à la surface du substrat, chaque

ANNEXE II : Présentation de techniques de fabrication développées pour les composants céramiques 3D

branche est prévue pour présenter une largeur de 100 μm les rendant suffisamment visible par la caméra de la machine d'impression. Dans ce dessin (Figure 1), est présentée une vue schématique de cet étape.

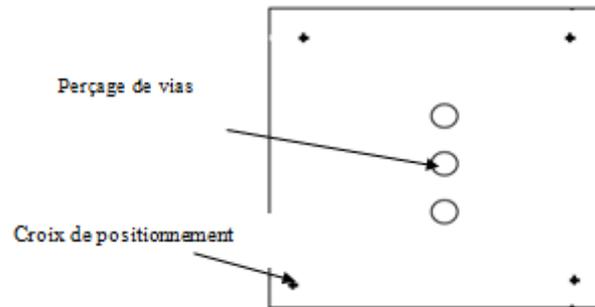


Figure 1 : 1^{ère} étape de fabrication (représentation non à l'échelle) : perçage des vias et croix de centrage

I.2. Etapes 2 et 3 : métallisation des vias

L'étape suivante a pour objectif principal de métalliser les vias. La méthode préférentielle pour cela sera une technique de métallisation par dépôt auto-catalytique de Cuivre. L'intérêt de cette technique est qu'elle repose sur une méthode de dépôt par voie humide qui est particulièrement bien adaptée à la métallisation de vias. De plus cette métallisation présente une bonne qualité d'accroche sur les céramiques, une épaisseur importante (5 μm) et présente une conductivité électrique très importante (40 à 45 S/ μm).

Cette étape sera aussi l'occasion de venir métalliser la face arrière du substrat et, via un masque, de ne métalliser que le pourtour proche des vias sur la face supérieure du substrat (Figure 2). A noter qu'une étape d'électrolyse or viendra compléter cette étape de métallisation. Une surcouche de 200 nm d'or sera déposée par-dessus la couche de Cuivre afin d'éviter l'oxydation de cette dernière.

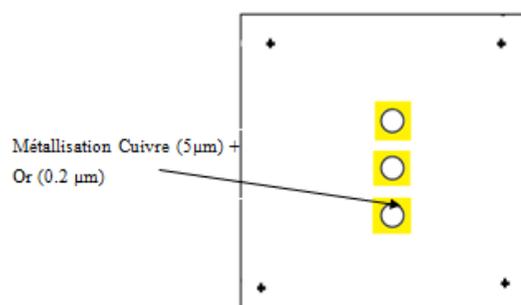


Figure 2 : 2^{ème} étape de fabrication : métallisation des vias et du plan de masse (vue schématique à la face arrière)

ANNEXE II : Présentation de techniques de fabrication développées pour les composants céramiques 3D

I.3. Etape 4: Impression par jet d'encre

A l'aide des croix de centrage, la machine d'impression par jet d'encre se centre sur la structure et vient déposer les couches métalliques et diélectriques nécessaires à la réalisation des filtres.

II. Présentation de la machine à ablation laser

En fin d'année 2011, le laboratoire Xlim s'est équipé d'une machine laser fournie par l'entreprise Cerinnov grâce à l'appui de la région Limousin et de la communauté Européenne. Le laboratoire Xlim s'est doté de tout le matériel nécessaire et adéquat pour la réalisation de filtres « tout céramique » avec un délai de temps et de coût réduits. Avec la technologie autocatalytique qui nous permet de déposer une couche de cuivre, la fabrication des filtres et des résonateurs avec plusieurs types de matériaux est possible, autonome et rapide.

Ludovic C. a présenté pour la première fois cette machine dans sa thèse. Avec cette dernière nous sommes capables sur un substrat d'alumine de percer des vias et de les découper. Cette machine laser que nous pouvons observer en photo sur la Figure 3 est composée d' :

- un laser ($\lambda=1080$ nm, diamètre faisceau 30 μm , pulsé ou continu),
- un poste de contrôle (PC),
- un support aspirant
- un système d'aspiration en cas de projection de matière lors du passage du laser,
- un système d'aspiration pour maintenir la pièce à graver contre le support.

ANNEXE II : Présentation de techniques de fabrication développées pour les composants céramiques 3D

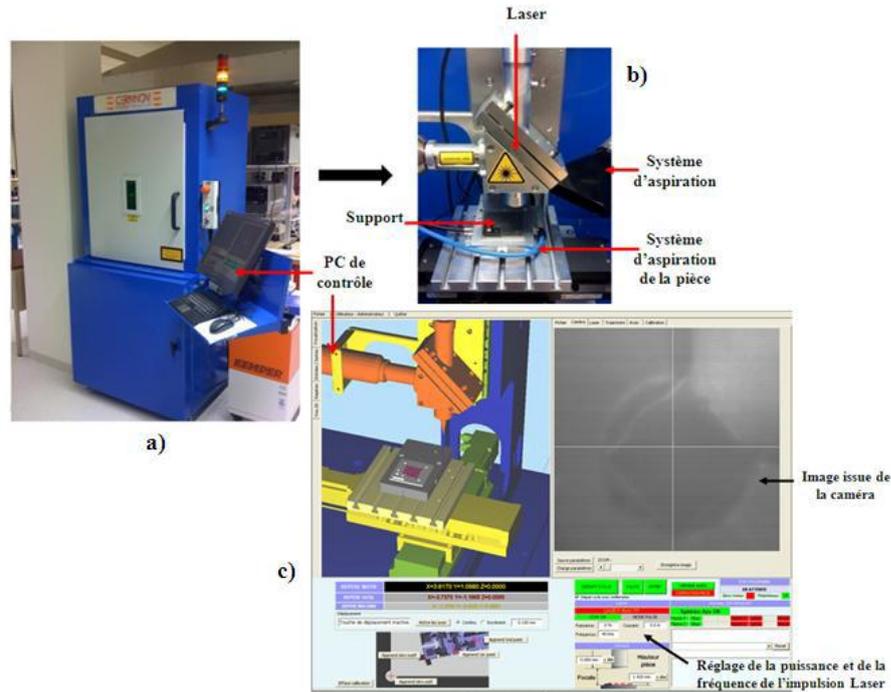


Figure 3 : Machine Laser Cerinnov a) vue extérieure ; b) vue intérieure ; c) interface du logiciel de contrôle de la machine

Nous souhaitons que le perçage des vias soit la plus propre possible et aux dimensions voulues. Pour cela, nous pouvons modifier certains paramètres laser tels que :

- puissance du laser ($P_{max} = 50W$),
- fréquence des pulsations laser (20 à 100 KHz),
- vitesse de déplacement du laser (1mm/s à 100mm/s) et jouer sur les zones de passage du laser.

Pour percer des vias, nous devons appliquer une forte puissance de 20 W. Le nombre de vias à percer est ici assez élevé (12 vias par filtre de référence et 7 pour un filtre multicouche). Pour économiser de la place sur les substrats utilisés, nous imprimerons 2 filtres de références par substrat de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ et 4 filtres multicouches par substrat. Un autre problème se pose quant à la distance entre chaque via (centre à centre) pour un filtre de référence de 1,38mm. Ainsi le nombre élevé de vias et leur espacement très proche nécessite un travail de perçage très délicat afin de ne pas fractionner le substrat d'alumine.

Un protocole a été optimisé consistant à graver progressivement le substrat et en descendant les points de focalisation du laser de $100 \mu\text{m}$ après 3 passages de ce dernier. Cette

ANNEXE II : Présentation de techniques de fabrication développées pour les composants céramiques 3D

approche se révèle peu agressive pour le substrat, évite sa casse et a permis d'atteindre l'objectif fixé (Figure 4, Figure 5) qui rend le perçage de tels vias faisable, on termine avec 4 filtres interdité multicouches par substrat et 2 filtre interdité de référence par substrat.

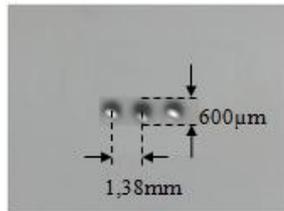


Figure 4: perçage de trois vias de 600 µm de diamètre espacés de 1.38 mm (centre à centre)

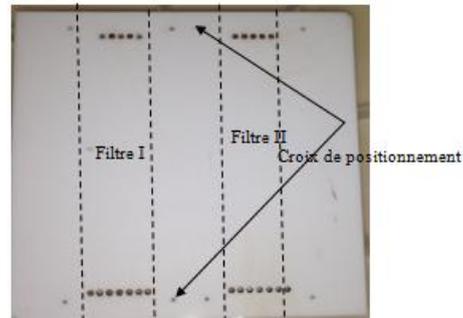


Figure 5 : Perçage ou via pour 2 filtres de références après perçage

Ce type d'approche ouvre la voie à d'autres applications comme la fabrication des filtres SIW découpés étant donné que nous sommes capables de percer des substrats épais (jusqu'à 1 mm d'épaisseur). Le seul inconvénient est le temps nécessaire par via (une heure par via) et le diamètre de via qui reste élevé pour des applications haute fréquence (le diamètre minimal de 400 µm). Des essais pour obtenir de vias de diamètres inférieures sont en cours.

A la fin de cette étape, nous métallisons de cuivre notre substrat par la technologie de dépôt auto-catalytique et lui appliquerons une protection anti-oxydation grâce à une fine couche d'or.

III. Le procédé de métallisation par bain autocatalytique

Utilisant un protocole de métallisation développé lors de la thèse de Ludovic Carpentier menée au laboratoire Xlim [1], des pièces en Alumine ont été ainsi métallisées au cours de cette thèse. Ce procédé a tout particulièrement été utilisé ici pour la métallisation de vias percés au laser dans des substrats d'Alumine et pour la métallisation 3D des résonateurs SIW présentés dans le chapitre 4.

Après avoir métallisé le substrat d'alumine nous avons cherché à caractériser la conductivité du cuivre déposé expérimentalement par la méthode utilisée en chapitre 2.

ANNEXE II : Présentation de techniques de fabrication développées pour les composants céramiques 3D

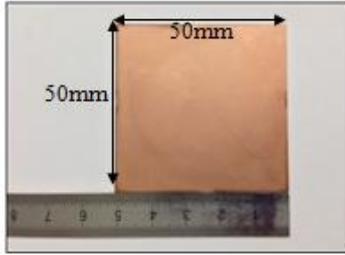


Figure 6.a: Plaque d'alumine métallisée de 50x50mm²

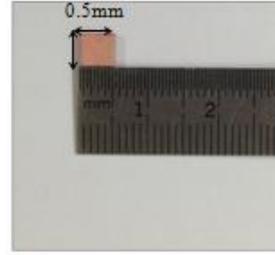


Figure 6.b: Plaque d'alumine métallisée de 0,5x0,5mm²

Cette technologie nous a permis d'avoir une très bonne conductivité (Figure 6 a et b) avec un gain au niveau du coût (évalué à 50 centimes par métallisation) et au niveau du temps (1h pour 5 μ m).

Mais comme pour toutes les technologies, cette technologie a un inconvénient : l'oxydation rapide de cuivre si ce dernier reste sans protection. Pour résoudre ce problème et éviter le contact de cuivre avec l'air, nous terminons cette étape par une électrolyse or.

Lorsque le substrat est conducteur, il est aisé d'obtenir cette couche métallique superficielle par voie électrolytique. Comme ce dépôt n'est pas possible qu'avec un substrat conducteur, dans notre cas le dépôt d'une couche de cuivre par electroless, une couche d'or de protection se viendra se mettre en place que sur les parties métallisées du substrat.

Références :

[1] Ludovic Carpentier, « *Filtres céramiques microondes par stéréolithographie 3D* », Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Décembre 2012.

RESUME

Ce mémoire est consacré à la caractérisation d'une technologie innovante par jet d'encre pour l'impression de composants hyperfréquences multicouches et multi-matériaux. Nous allons l'utiliser pour la réalisation de filtres interdigités à capacités multicouches qui seront mis en compétition avec des filtres standards. L'aspectes multicouches nous ouvre le chemin pour travailler sur des structures accordables qui pourraient être du même type que le filtre à capacités.

Le premier chapitre est constitué d'une étude bibliographique sur les technologies multicouches et en particulier cette technologie d'impression par jet d'encre. Dans le deuxième chapitre, nous avons testé cette dernière par l'impression de motifs élémentaires 2D avec une encre à base d'argent pour établir des différentes règles de conception à appliquer pour la création de composants HF. Une impression multicouche (argent et céramique) a ensuite été validée après un développement d'une encre diélectrique basée sur la céramique Heraeus 51K65 à cuisson basse température. Le troisième chapitre présente un filtre interdigité multicouche développé pour la fabrication par cette technologie permettant un gain de surface par rapport à un filtre interdigité en argent seul. A des fins prospectives, le quatrième chapitre présente un système planaire simple permettant aisément d'extraire un modèle équivalent d'un varactor (R_s et C_j) qui servirait de composant d'accord en fréquence et des exemples d'utilisation de ce composant sur des résonateurs accordables.

ABSTRACT

This thesis is devoted to the characterization of an innovative inkjet printing technology for the fabrication of multilayer and multi-material structures. We will use this technology to create printed single and multilayer interdigitated filters. The multilayer aspects open the way to work on tunable structures that could be the same type as the interdigitated multilayer filter.

The first chapter consists of a literature study on multilayer technologies and in particular the inkjet printing technology. In the second chapter, we tested this technology by printing 2-D patterns with –made with a silver ink in order to establish different design rules to be applied for the creation of RF components. A multilayer printing approach (silver and ceramic inks) is validated after a development of the ceramic-based ink developed with the Heraeus 51K65 dielectric material which can be fired at low temperature (800°C). The third section presents a multilayer filter fabricated by this technology in order to achieve footprint reduction compared to a silver monolayer interdigitated filter. The fourth chapter presents a simple planar system to easily retrieve an equivalent model of a varactor (R_s and C_j) to serve as a component of frequency tuning. Different examples of tunable resonators using such varactor are finally presented.

Mots clés : Jet d'encre – multicouches et multimatériaux – capacités MIM – Heraeus 51k65- Filtre interdigité- structures accordables – varactor